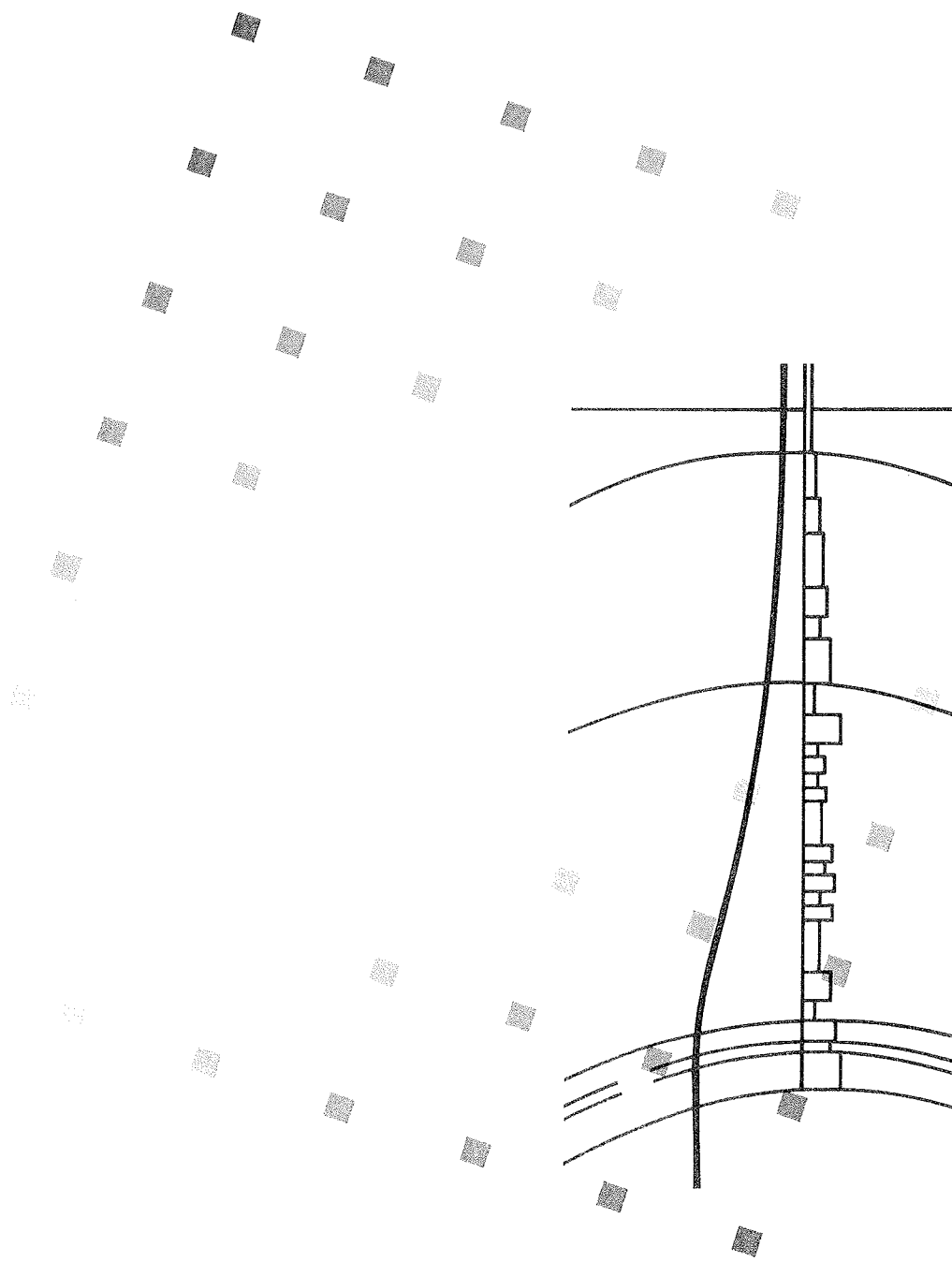


Geothermische reserves Centrale Slenk, Nederland

Exploratie en evaluatie



TNO-rapport

Geothermische Reserves Centrale Slenk, Nederland

OS 89-18

Exploratie en evaluatie

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten TNO', dan wel de betreffende
terzake tussen partijen gesloten
overeenkomst.

© TNO

Opdrachtgever:
**Nederlandse Maatschappij voor
Energie en Milieu - NOVEM BV**

Medefinanciering:
**Commissie van de Europese
Gemeenschappen**

Samenstelling:
J.P. Heederik

Auteurs:

J. Brugge	hfdst 2
C.H. Brummer	hfdst 4
Y.M.A. Coenegracht	hfdst 3
T.H.M. van Doorn	hfdst 2
J.P. Heederik	hfdst 1, 6, 7
A.J.M. Huurdeman	hfdst 4, 5, 6
P.F.M. Van Gaans	hfdst 3
L. Vasak	hfdst 2, 3, 7
R.M. Vierhout	hfdst 6
B.W. Zuurdeeg	hfdst 3

GEOOTHERMISCHE RESERVES CENTRALE SLENK, NEDERLAND

EXPLORATIE EN EVALUATIE

J.P. Heederik

Nederlandse Organisatie voor
Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek - TNO
Dienst Grondwaterverkenning

en

Comprimo BV

Contractnummers: . EN3G-0077-NL
-0097-NL
GE/018/86-NL
387/87-NL

EINDRAPPORT

Onderzoek gedeeltelijk gefinancierd door de
Commissie van de Europese Gemeenschappen

Directoraat Generaal voor Wetenschap, Onderzoek en
ontwikkeling (DG-XII)
Onderzoek- en ontwikkelingsprogramma, niet nucleaire energie
(Geothermische energie)

en

Directoraat Generaal voor Energie (DG XVII)
(Energie demonstratie projecten)

en door

Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu

Januari 1989

INHOUD

Lijst van tabellen	iv
Lijst van figuren	v
Lijst van annexes	vii
SAMENVATTING	S-1
1. INLEIDING	
1.1 Aardwarmte-onderzoek in Nederland	1.1
1.2 Geothermisch potentieel	1.2
1.3 Geothermische onderzoekboring	1.4
1.3.1 Ontwerp proefboring	1.4
1.3.2 Uitvoering proefboring	1.5
2. GEOLOGIE	
2.1 Inleiding	2.1
2.2 Regionale geologie	2.1
2.2.1 Paleogeografisch overzicht	2.1
2.2.2 Afzettingsmilieus gedurende het kenozoicum	2.3
2.2.3 Lithostratigrafie	2.3
2.2.4 Structurele geologie	2.5
2.3 Geologie van de boring Asten-2	2.6
2.3.1 Onderzoek en methodiek	2.6
2.3.2 Stratigrafie	2.9
2.3.3 Lithologische beschrijving van de formaties	2.9
2.4 Resumé	2.13
3. HYDROGEOCHEMIE	
3.1 Inleiding	3.1
3.2 Hydrogeologie	3.2
3.3 Methoden	3.3
3.3.1 Monsternamen	3.3
3.3.2 Chemische analyse	3.4
3.3.3 Thermodynamische berekeningen	3.5
3.4 Resultaten poriënwateronderzoek	3.5

3.5	Resultaten produktie test			3.6	
3.6	Samenstelling formatiewater			3.7	
3.6.1	Formatie van Houthem			3.7	
3.6.2	Zand van Berg			3.8	
3.7	Chemische evenwicht formatiewater			3.10	
3.7.1	Formatie van Houthem			3.10	
3.7.2	Zand van Berg			3.11	
3.8	Geschiktheid van het formatiewater voor balneologische doeleinden			3.13	
4.	FORMATIE EVALUATIE				
4.1	Inleiding			4.1	
4.2	Metingen			4.1	
4.2.1	Inleiding			4.1	
4.2.2	Boorgatmetingen			4.1	
4.2.3	Metingen aan monsters uit boorkernen			4.3	
4.2.4	Metingen aan boorgruis			4.4	
4.2.5	Repeat formation tests			4.4	
4.2.6	Putproeven			4.5	
4.3	Interpretatie van de metingen			4.5	
4.3.1	Inleiding			4.5	
4.3.2	Porositeit			4.6	
4.3.2.1	Directe methode om de porisiteit te bepalen			4.6	
4.3.3.2	Indirecte methode om de porisiteit te bepalen			4.7	
4.3.3	Permeabiliteit			4.8	
4.3.3.1	Permeabiliteitsmetingen			4.8	
4.3.3.2	Bepaling van de permeabiliteit			4.9	
4.3.4	Formatiedrukken			4.12	
4.3.5	Temperatuur			4.13	
4.3.6	Viscositeit			4.14	
4.3.7	Produktiviteitsindex			4.15	
4.4	Resultaten			4.15	
4.4.1	Kakert Laagpakket	850	- 1093	m	4.15
4.4.2	Zand van Voort	1196	- 1415,7	m	4.17
4.4.3	Zand van Berg	1494	- 1513	m	4.17
4.4.4	Basaal Zand van Dongen	1513,5	- 1530	m	4.18
4.4.5	Zand van Heers	1607	- 1636	m	4.19

4.4.6	Formatie van Houthem	1636 - einddiepte	4.19
4.5	Resumé		4.20
5.	VALIDATIE VAN PERMEABILITEITSBEPALINGEN AAN KORRELGROOTTE VERDELINGEN		
5.1	Inleiding		5.1
5.2	Indirecte methoden		5.2
5.3	Resultaten van de Asten-2 boring		5.6
6.	GEO THERMISCHE RESERVES		
6.1	Inleiding		6.1
6.2	Warmtevoorraad		6.2
6.2.1	Warmtevoorraad in het breukblok Asten		6.2
6.2.2	Warmtevoorraad in de Centrale Slenk		6.4
6.3	Geothermische reserves		6.5
6.4	Warmtevermogen		6.6
6.5	Toepassing van geothermische energie		6.7
7.	CONCLUSIES		7.1
8.	REFERENTIES		8.1

Lijst van tabellen

3.1	Vochtgehalten van het sediment en chloridegehalten van de formatiewaters	3.4
3.2	Ec, temperatuur en pH van het produktiewater	3.7
3.3	Chemische samenstelling formatiewater	3.10
4.1	Boorgatmetingen in de boring Asten-2	4.3
4.2	Matrixdichtheid (ρ_m)	4.6
4.3	Formatie parameters van het Kakert laagpakket	4.16
4.4	Functie parameters van het Zand van Heers	4.19
4.5	Resultaten van de formatie evaluatie	4.21
5.1	Permeabiliteiten bepaald aan kernen en met behulp van indirecte methoden	5.8
6.1	Gemiddelde gesteente en vloeistofeigenschappen	6.3
6.2	Warmtevoorraad in het breukblok Asten	6.4
6.3	Geothermische reserves in het breukblok Asten	6.5
6.4	Geothermische reserves in de Centrale Slenk	6.6

Lijst van figuren

1.1	Principe van aardwarmtewinning	1.2
1.2	Geologische prognose en schematisch ontwerp proefboring Asten	1.4
1.3	Gerealiseerde uitvoering van de proefboring	1.5
2.1	Structuurkaart van de Centrale Slenk en ligging van het breukblok Asten	2.1
2.2	Lithostratigrafie van het Kenozoicum	2.3
2.3	Schematisch geologisch (NW-ZO) profiel van de Centrale Slenk	2.6
2.4	Stratigrafisch schema van de boring Asten-2	2.9
3.1	Hydrogeologisch profiel over Asten	3.2
3.2	Vochtgehalte van sedimenten en chloridegehalte van het poriënwater	3.5
3.3	Chloridegehalte van het formatiewater	3.6
3.4	Verandering van de chemische samenstelling tijdens de ontwikkeling van de put	3.7
3.5	Calcietverzadiging bij verschillende p, T-condities (water in de Formatie van Houthem)	3.9
3.6	De pCO_2 in de aquifer (a, b, c, d) uitgezet als functie van alkaliteit en het totaal aan CO_2 species	3.11
4.1	Indeling in deelintervallen op basis van gamma ray (GR)-, spontane potentiaal (SP)- log en de stratigrafische indeling door RGD	4.4
4.2	Correlatie tussen de kernporositeit CPOR en de direct bepaalde porositeit PHI1	4.5
4.3	Overeenkomst tussen berekende porositeit uit de density log en de kernporositeit	4.6
4.4	Correlatie tussen de indirect bepaalde porositeit PHI2 en de kernporositeit CPOR	4.7
4.5	Overeenkomst tussen de berekende porositeit uit de formatiefactor en de kernporositeit	4.8
4.6	Verhouding van de water-/gas permeabiliteit als functie van de gaspermeabiliteit in het Zand van Berg	4.9
4.7	De gemeten kernporositeit en kernpermeabiliteit	4.10
4.8	Correlatie tussen de kernporositeit CPOR en de kernpermeabiliteit (N_2) CPER	4.11

4.9	Het drukverloop uit RFT metingen met de diepte	4.12
4.10	Het temperatuurverloop met de diepte en de temperatuurgradiënt	4.13
4.11	De viscositeit van formatiewater als functie van zoutgehalte (NaCl), temperatuur en druk	4.14
5.1	Sorteringsfactor volgens Van Baaren	5.3
5.2	Klasse van korrelgrootteverdeling volgens Breddin	5.4
5.3	Permeabiliteits-reductiefactor als functie van de fractie (niet-zwellende) klei en fijn silt (korrelgrootte 16 µm)	5.5
5.4	Karakteristieke korrelgrootteverdeling voor drie onderzochte formaties	5.6
5.5	Vergelijking van directe en indirecte methoden voor permeabiliteitsbepaling	5.7
5.6	Verhouding van directe en indirecte permeabiliteitsbepaling als functie van het "shale" gehalte (< 63 µm)	5.8
5.7	Verskil tussen directe en indirecte permeabiliteitsbepaling als functie van het "shale"-gehalte (< 63 µm)	5.9
6.1	Temperatuurverdeling binnen het breukblok Asten voor verschillende formaties	6.2
6.2	Temperatuurverdeling binnen de Centrale Slenk voor de Formatie van Breda en het Zand van Berg	6.4
6.3	Warmtevermogenkaart van de Centrale Slenk voor de Formatie van Breda en het Zand van Berg	6.7
A-1.1.1	Details putafwerking in de Formatie van Houthem.	A-1.16
A-1.2.1	Details putafwerking in het Zand van Berg in de oorspronkelijke proefboring.	A-1.18
A-1.2.2	Details side track in de 9 5/8" casing.	A-1.19
A-1.2.3	Horizontale en verticale projectie van gederiveerd boorgat, alsmede lokatie van achtergebleven boorstring (vis).	A-1.21
A-1.2.4	Detail putafwerking in het Zand van Berg in het gederiveerde boorgat.	A-1.22
A-2.1.1	Scheiding van klei- en zandfracties	A-2.1
A-2.1.2	Analyse van kleimineralen	A-2.3
A-2.1.3	Legenda van kleimineralen	A-2.3

Lijst van annexes

- 1.1 Gedetailleerd overzicht van de boor- en meetwerkzaamheden in verband met de uitvoering van de proefboring te Asten.
- 1.2 Overzicht booractiviteiten m.b.t. het aanboren, de putafwerking en het testen van het Zand van Berg.

- 2.1 Kleimineralogisch onderzoek van de boring Asten-2

- 3.1 Chemische samenstelling van het formatiewater uit de Formatie van Houthem
- 3.2 Chemische samenstelling van het formatiewater uit het Zand van Berg

- 4.1 Verklarende woordenlijst
- 4.2 Berekeningsmethode voor R_t en R_w

- 6.1 Gebruikte energie conversie bij aardwarmte

SAMENVATTING

In 1987 is de eerste geothermische proefboring in Nederland gereed gekomen. De boring is uitgevoerd door de Dienst Grondwaterverkenning TNO in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energie-opslag in Aquifers (NOAA) in opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM, voorheen PEO).

Vorbereiding, uitvoering en evaluatie geschiedde in nauwe samenwerking met de Rijks Geologische Dienst, de Rijks Universiteit Utrecht en het ingenieursbureau Comprimo BV. Het onderzoek is uitgevoerd met medefinanciering van het Directoraat Generaal voor Wetenschap Onderzoek en Ontwikkeling (DG XII) en van het Directoraat Generaal voor Energie (DG XVII) beiden van de Commissie van de Europese Gemeenschappen. Het onderzoek en de evaluatie van de resultaten van de proefboring hebben een grote hoeveelheid gegevens opgeleverd. De resultaten en conclusies met betrekking tot het geothermisch onderzoek in de Centrale Slenk zijn in dit eindrapport vastgelegd.

Aardwarmte-onderzoek in Nederland

Het programmatisch aardwarmte-onderzoek in Nederland dateert van 1979. Tussen 1979 en 1984 werd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Warmte-opslag (NOA-I) aan de hand van de beschikbare gegevens van in het verleden uitgevoerde olie-, aardgas-, steenzout- en steenkolen-verkenningsboringen, een inventarisatiestudie uitgevoerd naar het geothermisch potentieel van verschillende aquifers op diepten tussen ca. 1000 en 4000 m. Deze inventarisatiestudies verschaffen een globaal inzicht in de mogelijke lokaties voor het realiseren van aardwarmteprojecten in Nederland.

Aan de hand van de conclusies van het NOA-I is in 1985 een nieuw onderzoekprogramma geformuleerd en van start gegaan, het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energie-opslag in Aquifers (1985 - 1989), het NOAA. Belangrijk uitgangspunt voor het NOAA is het voortbouwen op de resultaten van het onderzoek dat in het kader van het NOA-I is uitgevoerd.

In het kader van het NOAA heeft de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM, voorheen PEO) in 1986 opdracht gegeven voor de uitvoering van de eerste geothermische onderzoekboring in Nederland. Doel van de proefboring was tweërlei. Enerzijds ging het om het onderzoeken van het geothermisch potentieel van drie geologische formaties, op verschillende diepten (nl. de Formatie van Breda, het Zand van Voort en het Basaal Zand van Dongen). Anderzijds ging het om het onderzoeken - op basis van de resultaten van de proefboringen - van de technische en economische haalbaarheid van een concreet aardwarmteproject, waarbij de aardwarmte voor de glastuinbouw zou kunnen worden benut.

Uitvoering proefboring

Bij het ontwerp van de proefboring is uitgegaan van de volgende gegevens en voorwaarden:

- de waarschijnlijke geologische opbouw op basis van boorgegevens van de boringen Asten-1 en Nederweert;
- een optimale verzameling van gegevens over de geologie en reservoirkenmerken;
- het uitvoeren van een produktie- en (re)injectietest op de diepst gelegen formatie;
- de mogelijkheid om, nadat de geothermische potentie van de aangeboorde formaties is aangetoond, de boring als produktie- of injectieput te kunnen gebruiken.

Oorspronkelijk was de geplande einddiepte voorzien op 1550 m -NAP. Echter aan de hand van een gedetailleerd onderzoek van de boorgegevens van de boring Asten (1) bleek er voldoende aanleiding te zijn om de boring tot een einddiepte van circa 1673 m - RT*¹ voort te zetten. Zodoende ontstond de mogelijkheid om nog een vierde formatie in het onderzoek te betrekken en te testen, namelijk de in België succesvol gebleken Boven Krijt Formatie, de Formatie van Houthem.

De uitvoering van de proefboring en het onderzoek naar de reservoirkarakteristieken van de verschillende formaties heeft plaatsgevonden

*) RT = Rotary Table: RT = 4,24 m + maaiveld, RT = 30,34 m + NAP.

gedurende twee perioden. In eerste instantie is tussen november 1986 en maart 1987 de proefboring en het geplande onderzoekprogramma uitgevoerd, inclusief een met behulp van luchtlift uitgevoerde putproef op de diepst gelegen formatie; de Formatie van Houthem (1636 - 1656 m - RT). Om de gunstige resultaten van de voorlopige reservoir evaluaties met betrekking tot het Zand van Berg te verifiëren is in tweede instantie ook op het Zand van Berg (1494 - 1513 m- RT) een produktietest uitgevoerd. Daartoe is in de periode maart-mei 1988 de boring op de desbetreffende diepte geopend en met een z.g. prepack filter afgewerkt. De produktietest is uitgevoerd met behulp van stikstof (N₂) lift.

Geologie

Tectonische activiteit gedurende de geologische wordingsgeschiedenis, met name ten tijden van het Tertiair en Kwartair, 60 miljoen jaar geleden tot heden, heeft geleid tot een uitgebreid breukensysteem in de regio Asten. De breuken zijn deels noordwest-zuidoost en deels westnoordwest-oostzuidoost gericht waardoor separate blokken zijn ontstaan. De daling van het Centrale Slenkgebied langs het noordwest-zuidoost strekkende breukensysteem heeft geresulteerd in diepteverschillen van de basis van het Tertiair van meer dan 1000 m. Ten westen van de Centrale Slenk ligt de basis van het Tertiair op circa 850 m diepte, ten oosten ligt deze op circa 600 m. De maximale diepte van de basis van het Tertiair in de Slenk bedraagt bijna 2000 m. Het breukensysteem van de Centrale Slenk bestaat uit een aantal over grote lengte vervolgbare breuken (met als belangrijkste de Peelrandbreuk) met daartussen een groot aantal kleinere breuken. De gesteentepakketten tussen deze breuken zijn in een aantal gevallen (ook in noord-zuid richting) nog eens opgebroken in kleinere brokken. De proefboring ligt in een dergelijk blok. De begrenzendende noordwest-zuidoost breuken liggen 2,5 kilometer uit elkaar en de afstand tussen de noord-zuid breuken bedraagt ongeveer 10 kilometer.

In de loop van het Tertiair en Kwartair ontwikkelde het sedimentatiemilieu in Nederland zich van een voornamelijk marien sedimentatiemilieu (Onder Paleoceen) tot continentale omstandigheden (Pleistoceen). Vooral onder de Tertiaire afzettingen bevinden zich formaties die ook elders

in Nederland plaatselijk gedeeltelijk goede reservoirkenmerken bezitten. In het Centrale Slenkgebied konden op voorhand vier formaties worden geïdentificeerd die in aanmerking kwamen om op hun geschiktheid voor geothermische toepassing te worden onderzocht. Van boven naar beneden:

- de Formatie van Breda, diepte ca. 940 - 1000 m -NAP;
- het Zand van Voort (de Formatie van Veldhoven), diepte ca. 1200 - 1400 m -NAP;
- het Basaal Zand van Dongen (de Formatie van Dongen), diepte ca. 1500 - 1530 m -NAP;
- de Formatie van Houthem, diepte ca. 1650 - 1670 m -NAP.

Aan de hand van de resultaten van de proefboring, met name van het boorkernonderzoek, kon in een later stadium het Zand van Berg (de Formatie van Rupel), direct boven het Basaal Zand van Dongen, hieraan worden toegevoegd. De proefboring heeft een nauwkeurige beschrijving van de lagenstructuur en de gesteentekennmerken opgeleverd van de verschillende voor de geothermie van belang zijnde reservoirformaties.

Geochemie

Het is doorgaans moeilijk bij boringen goede gegevens te verkrijgen over de samenstelling van het formatiewater op verschillende diepten. Slechts in incidentele gevallen wordt water geproduceerd en dan nog pas als de einddiepte is bereikt.

Door het Vening Meinesz Laboratorium van de Rijks Universiteit Utrecht is een methode ontwikkeld om de leemten aan deze geochemische informatie op te vullen door poriënwateronderzoek aan sediment monsters. Het voor dit onderzoek bruikbare monstermateriaal bestond uit stukjes boorkernmateriaal, kluiten van de boorkop en omhooggevoerde kluiten en 'klontjes' bemonsterd op de schudzeef. In deze volgorde nam de kwaliteit van de monsters af. De monsters werden gecontroleerd op contaminatie door boorspoeling. Na een eerste weging wordt het poriënwater aan de monsters onttrokken, waarna door drogen en wegen van het monster het poriënvolume kan worden bepaald. Het chloridegehalte van het onttrokken poriënwater geeft een redelijk betrouwbare benadering van de oorspronkelijke chloridegehalten van monsters van verschillende diepten.

Aangezien onder het 'zoet-zout' grenswater chloride het belangrijkste bestanddeel is van het formatiewater, is het chlorideprofiel tevens representatief voor het totale gehalte opgeloste stof. De minima in de curve geven een indruk van het zoutgehalte gedurende een vroegere verzoetingsfase, de maxima zijn een indicatie voor de huidige verzilting van de zandige lagen. Het chloridegehalte van het water dat de huidige verzilting veroorzaakt (25 000 - 60 000 mg/l) is aanzienlijk hoger dan het chloridegehalte van zeewater (19 300 mg/l). Het 'zoet-zout' grensvlak (chloridegehalte ca. 150 mg/l) ligt in Asten op circa 320 meter.

Het diepe grondwater in de Centrale Slenk is een vermenging van zoet infiltratiewater afkomstig van de Ardennen en de Eifel en van zout tot zeer zout thermaal formatiewater dat via spleten en verkarste zones omhoog kwelt en uitstroomt in het Tertiaire dek van de Centrale Slenk. Het zoutgehalte neemt in noordwestelijke richting toe. Gedurende de geologische geschiedenis hebben verzilting en verzoeting elkaar afgewisseld. In de Centrale Slenk liggen het zoet-zout grensvlak (150 mg/l chloride) en het 1000 mg/l isochloride grensvlak honderden meters uit elkaar. In Asten bedraagt deze afstand iets minder dan 700 m.

Formatie evaluatie

Porositeit, poriënhoud, permeabiliteit en temperatuur zijn de belangrijkste karakteristieken van geologische formaties die gezamenlijk het geothermisch potentieel en in belangrijke mate het reservoirgedrag bepalen. Petrofysische interpretatiemethoden spelen een belangrijke rol in het proces van formatie evaluatie. Gebruik makende van gegevens van ondermeer geofysische boorgatmetingen en metingen aan kernen zijn deze karakteristieken geëvalueerd.

De porositeit en permeabiliteit van de gekernde trajecten zijn gemeten aan de kernen. Door over de gekernde trajecten de kernporositeit en -permeabiliteit te correleren met de berekende en/of - aan de hand van de verschillende geofysische boorgatmetingen - afgeleide porositeit en permeabiliteit, kunnen voor de niet gekernde trajecten voldoende betrouwbare porositeit- en permeabiliteitwaarden worden bepaald.

Voor de verschillende reservoirs die voor geothermische toepassing in aanmerking komen is de gemiddelde of representatieve porositeit en

permeabiliteit berekend, alsmede de totale transmissiviteit (permeabiliteit maal laagdikte) van het uit verschillende pakketten bestaande reservoir. Met de vergelijking van Darcy is de z.g. produktiviteitsindex berekend. De produktiviteitsindex is een grootheid die de produktie van het desbetreffende reservoir aangeeft bij een drukverlaging van één bar.

De belangrijkste resultaten van de formatie evaluatie zijn weergegeven in tabel 1. Uit evaluatie van de boorgatmetingen en de kernen is gebleken dat in de Formatie van Breda en in het Zand van Berg zones aanwezig zijn, die eventueel voldoende produktiviteit bezitten om voor het geothermische exploitatie in aanmerking te komen; $PI_{Breda} = 13,7$ [m^3/h]bar; $PI_{Berg} = 2,9$ [m^3/h]bar.

Aquifer	Diepte (M-RT) (m)	Dikte (m)	Tempe- ratuur (°C)	Porositeit (%)	Permea- biliteit (mD)	Produktiviteits- index (m^3/h /bar)
Formatie van Breda	939 - 998	59	35,5	0,40	820	13,7
Zand van Voort	1196 - 1415	219	49,2	0,32	7	0,5
Zand van Berg	1494 - 1513	19	59,5	0,35	370	2,9
						0,2* (0,5-1,0)
Basaal Zand van Dongen	1513 - 1530	17	60,0	0,24	3	0,02
Zand van Heers	1628 - 1636	8	62,3	0,38	240	1,1
Formatie van Houthem	1636 - 1651	15	62,9	0,23	25	0,60*

* Produktiviteitsindex van de put ontleend aan putproef.

Tabel 1 Resultaten van de formatie evaluatie.

Geothermische reserves

De geothermische reserves van een gebied zijn afhankelijk van de temperatuurgradiënt, waarmee de temperatuur op elke gewenste diepte kan worden berekend, en van reservoir eigenschappen die de winbaarheid van het warme formatiewater bepalen. In Nederland varieert de temperatuurgradiënt van plaats tot plaats tussen 3 °C/100 m en 4 °C/100 m. In het Asten-blok bedraagt de gemiddelde temperatuurgradiënt circa 3,2 °C/100 m. De warmtevoorraad van een bepaald reservoir wordt bepaald door het volume van het reservoir, de beschikbare hoeveelheid

formatiewater en de gemiddelde temperatuur, de dichtheid van het water en de matrix, alsmede door de warmtecapaciteit van het water en de matrix.

Bij de bepaling van de benutbare warmte ΔT worden twee gevallen onderscheiden; nl. aardwarmtewinning zonder inpassing van een warmtepomp en winning met inpassing van een warmtepomp. Zonder warmtepomp zal de minimale injectietemperatuur circa 30 °C bedragen, met warmtepomp kan de injectietemperatuur dalen tot 17 °C. Niet al de beschikbare warmte kan worden geproduceerd. In Frankrijk is het gebruikelijk om een winningsfactor van 0,33 te hanteren. Daar onderbouwende studies voor wat de Nederlandse situatie betreft ontbreken, is voor dit onderzoek bij Asten een conservatieve winningsfactor van 0,25 aangenomen. Toepassing van de hierboven genoemde uitgangspunten bij de berekening van de geothermische reserves in het breukblok Asten leidt tot het in tabel 2 weergegeven resultaat.

Formatie	<u>Geothermische reserves</u>	
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
Formatie van Breda	$6,8 \times 10^{15} \text{J}$	$22,7 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Berg	$10,1 \times 10^{15} \text{J}$	$14,4 \times 10^{15} \text{J}$
Totaal van het breukblok Asten	$16,9 \times 10^{15} \text{J}$	$37,1 \times 10^{15} \text{J}$
Uitgedrukt in ton olie-equivalent	$390 \times 10^3 \text{ TOE}$	$850 \times 10^3 \text{ TOE}$
Uitgedrukt in aardgasequivalent	$525 \times 10^6 \text{ Nm}^3$	$1150 \times 10^6 \text{ Nm}^3$

Tabel 2 Reserves in het breukblok Asten.

Door extrapolatie van de resultaten van de proefboring voor het breukblok Asten kan de geothermische reserve van de Centrale Slenk globaal worden geschat. Bij een dergelijke extrapolatie wordt aangenomen dat de reservoir eigenschappen van beide formaties continu zijn in de Centrale Slenk. Om de onzekerheid van deze aanname te verdisconteren zijn de reserves met een factor 0,25 vermenigvuldigd (tabel 3).

Formatie	<u>Geothermische reserves</u>	
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
Formatie van Breda	$109,5 \times 10^{15}$ J	$288,5 \times 10^{15}$ J
Zand van Berg	$107,8 \times 10^{15}$ J	$158,8 \times 10^{15}$ J
Totaal van het breukblok Asten	$217,3 \times 10^{15}$ J	$447,3 \times 10^{15}$ J
Uitgedrukt in ton olie-equivalent	5×10^6 TOE	$10,3 \times 10^6$ TOE
Uitgedrukt in aardgasequivalent*)	$6,7 \times 10^9$ Nm ³	$13,9 \times 10^9$ Nm ³

* initiële schatting (1959) aardgas reserve gasveld-Slochteren 1650×10^9 Nm³.

Tabel 3 Reserves in de Centrale Slenk.

Nadeel van het op deze wijze kwantificeren van geothermische reserves is dat er slechts in beperkte mate rekening wordt gehouden met de economische winbaarheid van deze reserves. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen kan de geothermische reserve worden uitgedrukt in het zg. warmtevermogen van de formatie op een bepaalde plaats. Het warmtevermogen wordt uitgedrukt in het geleverde vermogen per eenheid van temperatuur en drukdaling en is een functie van de reservoir-eigenschappen van de formatie en de temperatuursafhankelijke vloeistofeigenschappen, alsmede van de putstraal en de invloedstraal van het putsysteem.

Op iedere gewenste plaats in de Centrale Slenk kan het warmtevermogen worden berekend. Tevens is het mogelijk om per formatie een warmtevermogenkaart van het gebied samen te stellen. Met de warmtevermogenkaart kan, in combinatie met de informatie over de produktiviteit van de formatie en de temperatuurkaart, voor iedere gewenste lokatie het thermisch vermogen van de produktieput van een geothermisch doublet worden geraamd. Het warmtevermogen van de twee potentiële formaties ter plaatse van Asten bedraagt: Formatie van Breda 17,8 kW/bar °C, Zand van Berg 3,8 kW/bar °C.

Wanneer voor het beoogde debiet de benodigde drukdaling ΔP en het verschil tussen produktie- en injectietemperatuur ΔT bekend zijn, kan het vermogen van een geothermisch doublet eenvoudig worden berekend.

	Zand van Berg	Formatie van Breda
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
ontwerpdebiet	100 m ³ /h	200 m ³ /h
ΔP	34 bar	15 bar
ΔT	29,5 °C	18,5 °C
thermisch vermogen	3,8 MW	4,9 MW

Tabel 4 Thermisch vermogen van de twee formaties op de Asten-
 lokatie.

Mogelijkheden voor aardwarmtewinning

Ofschoon de Centrale Slenk aanzienlijke geothermische reserves herbergt zijn de mogelijkheden voor winning van meer factoren afhankelijk dan alleen de geologische condities en reservoir eigenschappen. Als knelpunten die de implementatie van aardwarmte moeilijk maken, kunnen worden genoemd:

- onzekerheid over de beschikbaarheid van een goed reservoir;
- de energieprijis;
- de inpasbaarheid van aardwarmte in bestaande lage temperatuur verwarmingssystemen;
- institutionele knelpunten (bestemmingsplannen, contracten voor langdurige levering van aardgas en elektriciteit, etc.).

Voor de winning van lage temperatuur aardwarmte kan gebruik gemaakt worden van een z.g. geothermisch doublet. Een doublet bestaat in principe uit twee putten, een produktie- en een injectieput. Het opgepompte warme formatiewater wordt via een warmtewisselaar geleid, waar het de warmte afstaat aan een warmtetransportleiding, vervolgens wordt het inmiddels afgekoelde formatiewater in de oorspronkelijke formatie terug geïnjecteerd.

Afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid benutbare warmte en de gewenste hoeveelheid warmte kan een warmtepomp, een warmtekrachteenheid of een combinatie van beide aan het doublet worden toegevoegd.

Met betrekking tot de toepassingsmogelijkheden van aardwarmtewinning zijn de volgende gebruikerscategorieën globaal onderzocht:

- glastuinbouw
- ziekenhuizen (300 bedden)
- meergezinswoningen (60 woningen)
- zwembaden
- thermale baden.

Uit het onderzoek is gebleken dat de kostprijs per warmte-eenheid (kWh) gevoelig is voor variatie van een aantal factoren, zoals de equivalente vollasttijd per jaar van de aardwarmtebron, de capaciteit van de aardwarmtebron en de investeringen in een eventuele warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie; de onderhoud- en bedieningskosten; en de reële rente en aflossing van de investeringen.

Voor iedere warmtegebruikerscategorie geldt een specifieke jaarbelastingsduurcurve waarmee de equivalente vollasttijd kan worden bepaald. Hierbij zijn voor de verschillende gebruikerscategorieën twee opties doorgerekend, nl. de inzet van de aardwarmtebron als basislast eenheid zonder- en met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie.

Aan de hand van het basislastvermogen, de equivalente vollasttijd en de verbrandingswaarde van aardgas zijn per aquifer voor de verschillende gebruikerscategorieën op jaarbasis de realiseerbare energie c.q. aardgasbesparingen bepaald. Uit deze berekening is naar voren gekomen dat de Formatie van Breda en het Zand van Berg mogelijk in aanmerking kunnen komen voor aardwarmtewinning.

Zonder de inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie blijkt de grootste netto aardgasbesparing ($1,2 \times 10^6$ Nm³/jaar) realiseerbaar bij winning van aardwarmte uit het Zand van Berg ten behoeve van de glastuinbouw. In geval van aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda is voor alle gebruikerscategorieën het energieverbruik van het doublet hoger dan de bruto energiebesparing, derhalve is er sprake van een negatieve netto energiebesparing. Met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie blijkt de netto energiebesparing bij aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda ten behoeve van de glastuinbouw en de woningbouw aanzienlijk, namelijk respectievelijk 6×10^6 en $4,5 \times 10^6$ Nm³/jaar.

Conclusie

De proefboring heeft aangetoond dat het gebruik van geologische inventarisatiestudies voor het schatten van de geothermische reserves met grote voorzichtigheid dient te geschieden. Voor de aanvang van de boring waren vier min of meer potentiële geothermische reservoirs geïdentificeerd. Hiervan bleek één reservoir (Formatie van Breda) werkelijk geschikt. Het Zand van Berg kon op grond van de reeds beschikbare geologische gegevens niet als potentiële reservoirformatie worden geïdentificeerd.

Aan de hand van de resultaten van de proefboring kunnen schattingen van het geothermisch potentieel op basis van de resultaten van het NOA-I voor bepaalde geologische formaties worden gevalideerd en/of worden bijgesteld. Voor een betrouwbare bepaling van de geothermische reserves elders in Nederland of in andere geologische formaties zullen proefboringen, zoals in Asten, onontbeerlijk zijn.

De technische realiseerbaarheid van aardwarmtewinning kan in de praktijk worden onderzocht door de inrichting van een geothermisch testdoublet.

Uit de economische evaluatie is gebleken dat onder de huidige omstandigheden aardwarmtewinning, uit de Formatie van Breda met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie ten behoeve van de glastuinbouw, (minimum oppervlakte 20 ha), economisch haalbaar wordt bij een aardgasprijs van circa 35 - 60 cent per Nm³.

1. INLEIDING

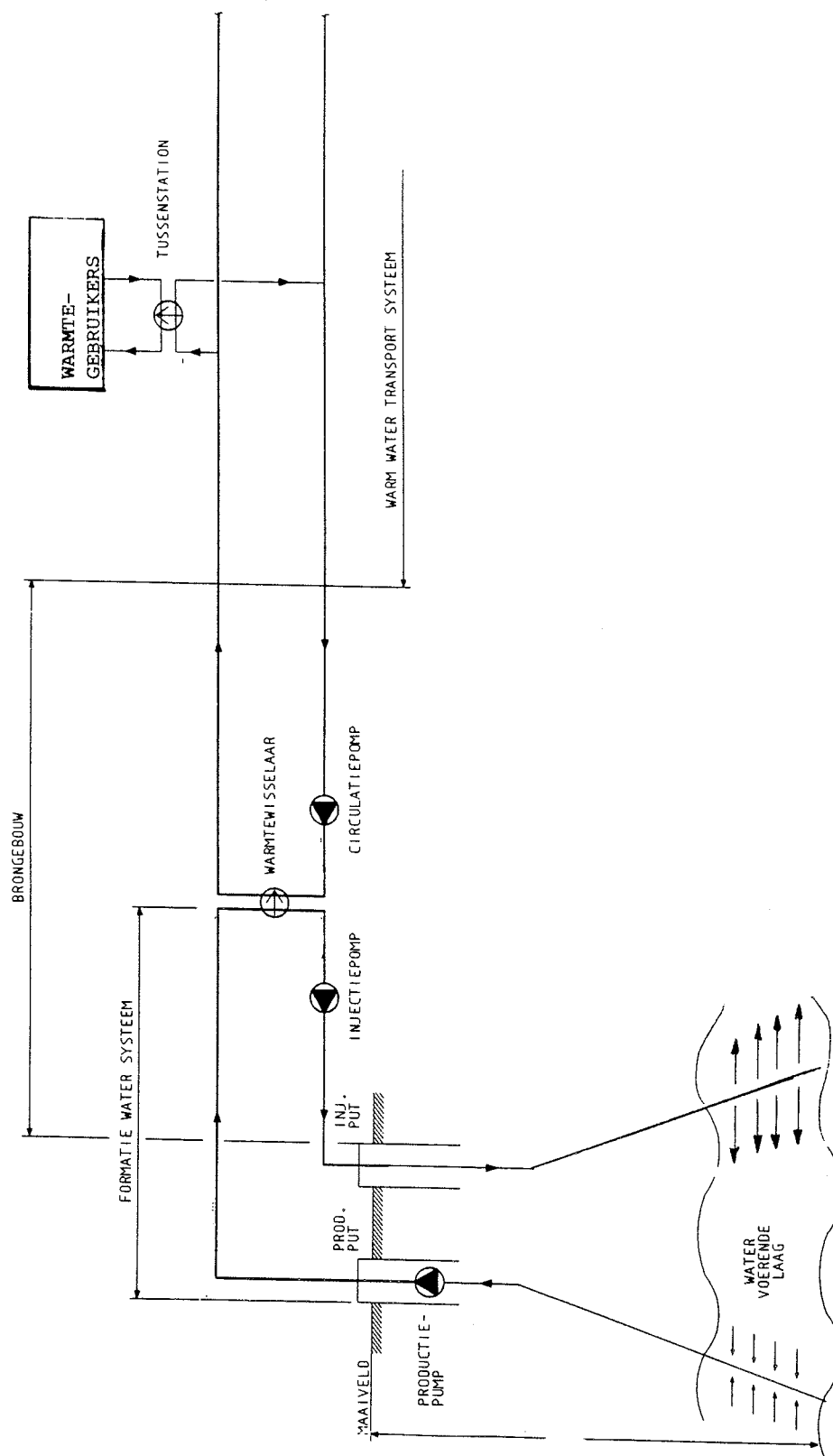
1.1 Aardwarmte-onderzoek in Nederland

Opeenvolgende oliecrises en een toenemende belasting van het milieu door de uitstoot van schadelijke verbrandingsprodukten van fossiele brandstoffen hebben er onder andere toe geleid dat sinds het begin van de jaren '70 de belangstelling voor duurzame, milieuvriendelijke energiebronnen sterk is toegenomen. Geothermische energie, ook wel aardwarmte genoemd, wordt evenals zonne-energie, windenergie en getijdenenergie gerekend tot de duurzame energiebronnen.

Het programmatisch aardwarmte-onderzoek in Nederland dateert van 1979. Tussen 1979 en 1984 werd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Warmte-opslag (NOA-I) aan de hand van de beschikbare gegevens van in het verleden geboorde olie-, aardgas-, steenzout- en steenkolen-verkenningsboringen, een inventarisatiestudie uitgevoerd naar het geothermisch potentieel van verschillende aquifers op diepten tussen ca. 1000 en 3000 m. Deze inventarisatiestudies verschaffen een globaal inzicht in de mogelijke lokaties voor het realiseren van aardwarmteprojecten in Nederland.

Aan de hand van de conclusies van het NOA-I is in 1985 een nieuw onderzoekprogramma geformuleerd en van start gegaan, het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energie-opslag in Aquifers (1985 - 1989), het NOAA. Belangrijk uitgangspunt voor het NOAA is het voortbouwen op de resultaten van het onderzoek dat gedurende het NOA-I is uitgevoerd.

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Aardwarmte en Energie-opslag in Aquifers (NOAA) heeft de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM, voorheen PEO) in 1986 opdracht gegeven voor de uitvoering van de eerste geothermische onderzoekboring in Nederland. De onderzoekboring te Asten/Heusden en het geothermische onderzoek zijn onder directie van de Dienst Grondwaterverkenning TNO uitgevoerd, in nauwe samenwerking met de Rijks Geologische Dienst, de Rijks Universiteit Utrecht en het ingenieursbureau Comprimo B.V. Het onderzoek, inclusief de proefboring is gefinancierd door de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM) en de Commissie van de Europese Gemeenschappen, te weten het Directoraat Generaal voor



Figuur 1.1 Principe van aardwarmtewinning.

Wetenschappen, Onderzoek en Ontwikkeling (DG XII) en het Directoraat Generaal voor Energie (DG XVII).

Het onderzoek was in eerste instantie gericht op het bepalen van de geothermische reserves in de Centrale Slenk. In tweede instantie zijn - op basis van de resultaten van het onderzoek - door Comprimo de toepassingsmogelijkheden onderzocht voor lage enthalpie geothermische energie in de Centrale Slenk. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de volgende gebruikers categorieën:

- Glastuinbouwbedrijven
- Standaard ziekenhuizen (300 bedden)
- Meergezinswoningen (60 woningen per blok)
- Zwembaden

1.2 Geothermisch potentieel

Als gevolg van het verval van radio-actieve isotopen in de aardkorst en de warmteweerstand van de aardlagen neemt overal op aarde de temperatuur met de diepte toe. De toename van de temperatuur met de diepte wordt de geothermische gradiënt genoemd. In Nederland bedraagt de geothermische gradiënt 3 tot 3,5 °C per 100 m. Uitgaande van een constante temperatuur van 10 à 12 °C nabij de oppervlakte, op een diepte van ca. 5 meter bedraagt de temperatuur op een diepte van 100 m ca. 15 °C, op 500 m ca. 30 °C, op 1000 m ca. 45 °C, op 1500 m ca. 60 °C en op een diepte van 2000 m ongeveer 75 °C, en zo verder.

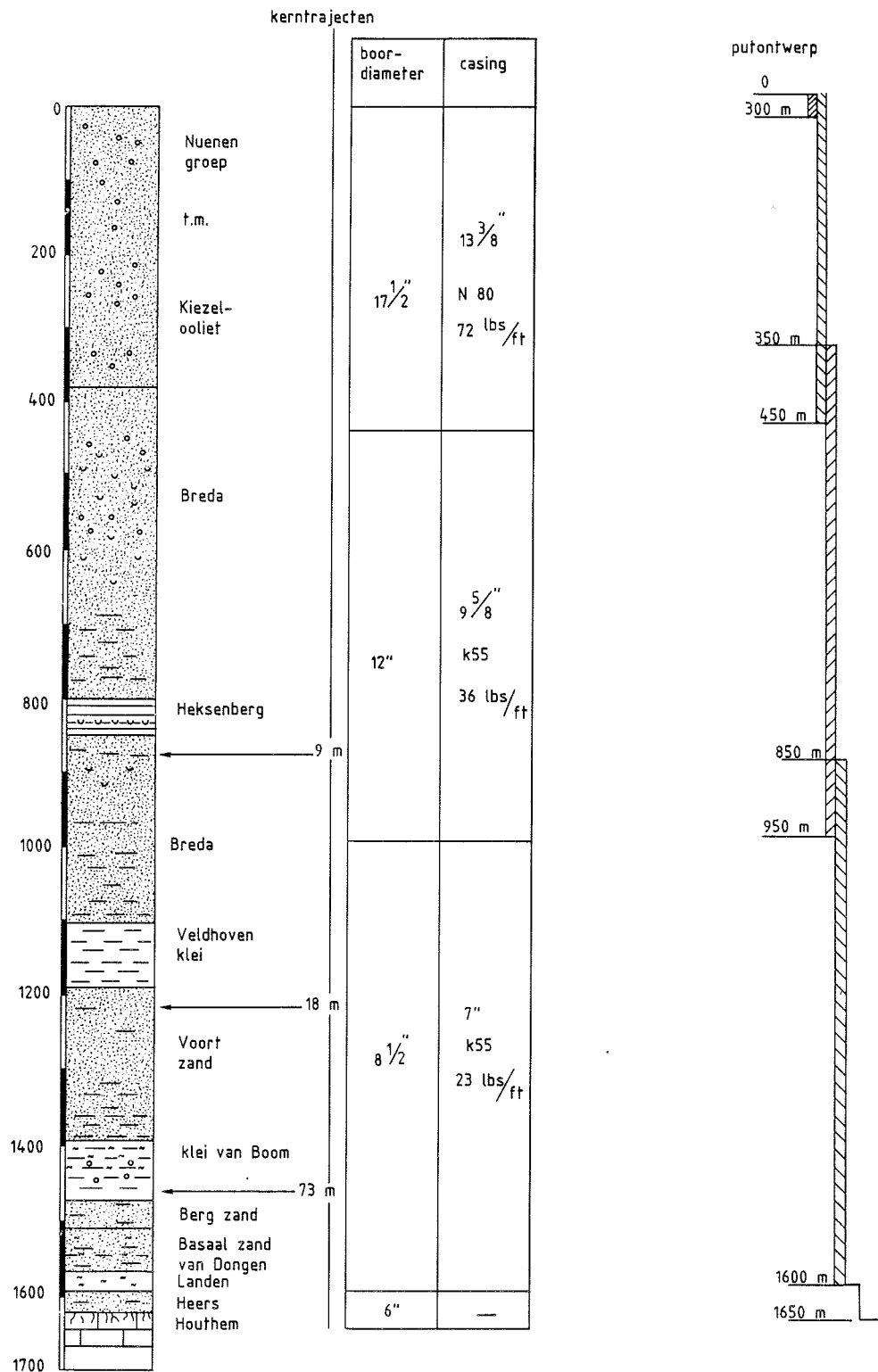
Om de aardwarmte in de vorm van heet water te kunnen winnen, zal de ondergrond of het gesteente aan een aantal voorwaarden moeten voldoen om als reservoir te kunnen dienen. Zo dient de aquifer waarin het hete water voorkomt voldoende dik te zijn en over voldoende porositeit te beschikken om grote hoeveelheden water te kunnen bergen. Om het aanwezige water op economische wijze te kunnen oppompen, dient de aquifer voldoende permeabiliteit te bezitten. De permeabiliteit is een maat voor het gemak waarmee het water zich door een aquifer kan bewegen, dus kan worden opgepompt. Verder dient de aquifer zich over een voldoende groot horizontaal oppervlak uit te strekken en in horizontale richting voldoende continuïteit te bezitten. Figuur 1.1 toont het principe van aardwarmtewinning.

Lage-enthalpie aardwarmte wordt om verscheidene redenen gewonnen met behulp van een zg. geothermisch doublet. Een doublet bestaat in principe uit twee putten, een injectie- en een produktieput. Het warme formatiewater wordt door een onderwaterpomp in de produktieput omhoog gepompt, via een warmtewisselaar geleid, waar het warmte afstaat aan een warmtetransportleiding, en vervolgens wordt het inmiddels afgekoelde formatiewater door de injectieput in de oorspronkelijke formatie terug-geïnjecteerd. De belangrijkste redenen voor toepassing van het doubletprincipe zijn handhaving van de druk in het reservoir en het hoge zoutgehalte van het formatiewater.

Afgezien van de levensduur van de technische voorzieningen wordt de levensduur van een project bepaald door de periode dat een geothermische doublet de vereiste warmte kan blijven leveren. Dit is onder meer afhankelijk van het debiet (de opbrengst in m^3/h), van de afstand tussen het produktie- en injectiepunt in de aquifer, van de porositeit en van de reservoirdikte. Wanneer het debiet, de porositeit en dikte van het reservoir bekend zijn, kan bij een gevraagde levensduur de ondergrondse afstand tussen de twee putten van een geothermisch doublet worden berekend.

In beginsel blijken de geo(hydro)logische omstandigheden in Nederland gunstig te zijn voor de winning van lage-temperatuur aardwarmte. Deze conclusie is voornamelijk gebaseerd op bestaande gegevens die niet als zodanig voor het aardwarmte-onderzoek zijn verzameld. Mede daarom was men zich bij de afronding van de eerste fase van het aardwarmte-onderzoek in 1984 bewust, dat voor een zinvol vervolg van het onderzoek geothermische onderzoekboringen noodzakelijk zouden zijn. Met de resultaten van dergelijke onderzoekboringen kunnen eerdere conclusies worden geverifieerd en is het mogelijk om een meer betrouwbare schatting te maken van het geothermisch potentieel van de verschillende geologische formaties. Ook voor het onderzoek naar de technische en economische haalbaarheid van concrete projecten zijn de resultaten van onderzoekboringen essentieel.

SCHEMATISCH ONTWERP PROEFBORING ASTEN.



Figuur 1.2 Geologische prognose en schematisch ontwerp proefboring.

1.3 Geothermische onderzoekboring

1.3.1 Ontwerp proefboring

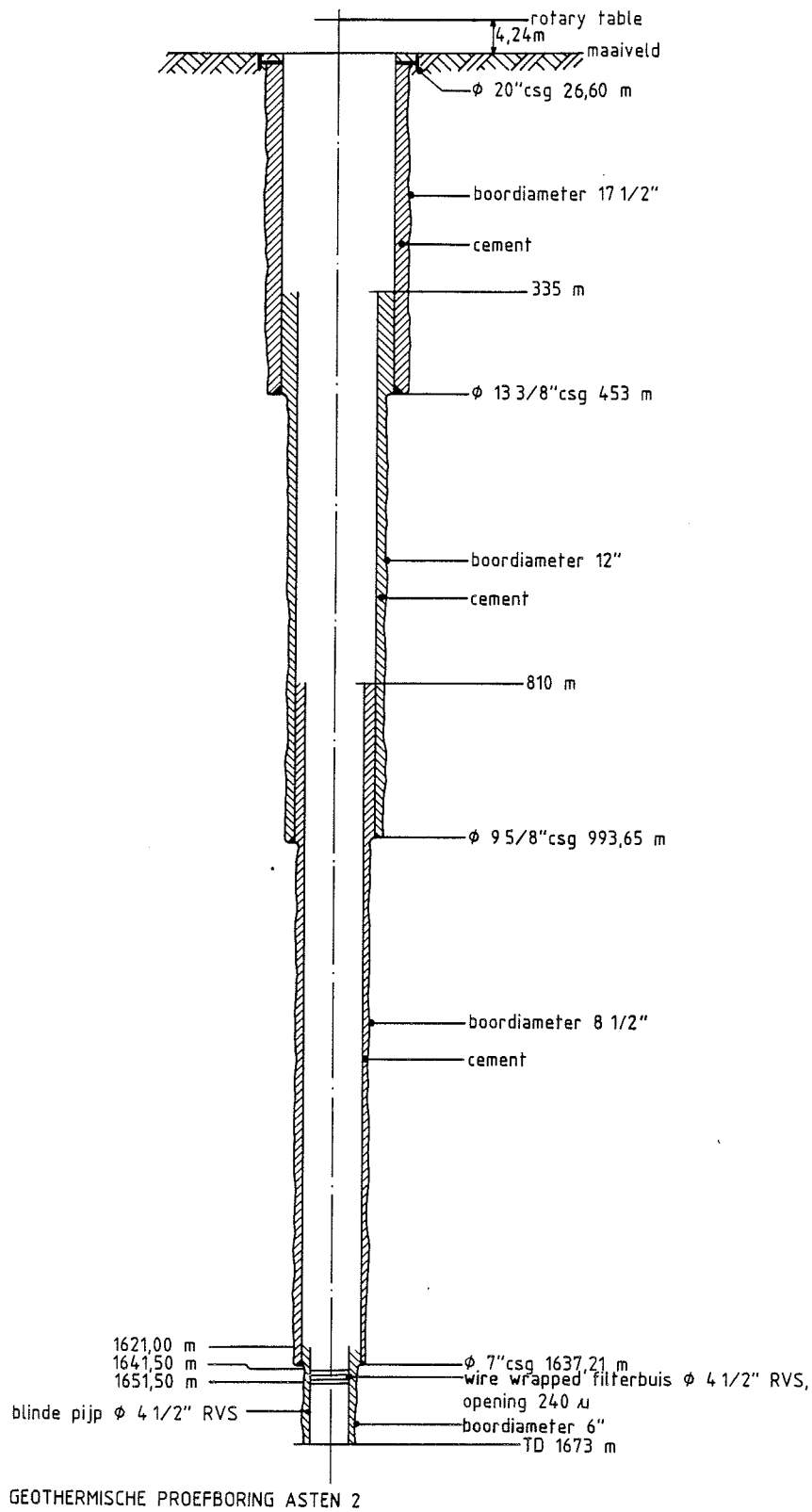
Bij het ontwerp van de proefboring is uitgegaan van de volgende gegevens en voorwaarden:

- waarschijnlijke geologische opbouw op basis van boorgegevens van in de jaren 50 uitgevoerde olie exploratieboringen in de regio, nl. de boringen Asten (1) en Nederweert. De geologische prognose die gehanteerd is bij het ontwerp van de boring is weergegeven in figuur 1.2;
- optimale data acquisitie m.b.t. de geologie en reservoir kenmerken;
- uitvoeren van een produktietest op de diepst gelegen formatie. Permeabiliteiten van de hoger gelegen formaties zullen worden bepaald door middel van z.g. repeat formation tests (RFT), waarbij op eerder vastgestelde diepten de permeabiliteit van het gesteente wordt gemeten;
- mogelijkheid om, nadat de geothermische potentie van de aangeboorde formaties is aangetoond, de boring als produktie- of injectieput van een eventueel te realiseren "geothermisch doublet" te kunnen gebruiken. Hierbij is rekening gehouden met de inbouwbaarheid van een voldoende grote onderwaterpomp op een diepte van circa 250 m.

Een geothermisch doublet bestaat in principe uit een produktie- en injectieput. Bovengronds staan beide putten bij voorkeur zo dicht mogelijk bij elkaar. Om ondergronds toch voldoende afstand te creëren tussen het winningspunt van warm water en het injectiepunt van het afgekoelde water, worden beide putten in het algemeen gedevieerd geboord.

Echter aangezien de eerste doelstelling van de proefboring was het verkrijgen van betrouwbare geologische gegevens en reservoir-eigenschappen over het gehele profiel van de boring, werd voor een verticale boring gekozen. Vanwege de levensduur van een eventueel in de toekomst te realiseren geothermisch testdoublet zou een gedevieerde boring gunstiger - maar ook veel duurder - zijn geweest.

Oorspronkelijk was de geplande einddiepte voorzien op 1550 m -NAP. Echter aan de hand van een gedetailleerd onderzoek van de boorgegevens van de boring Asten (1) bleek er aanleiding te zijn om de boring tot



Figuur 1.3 Gerealiseerde uitvoering van de proefboring.

een einddiepte van circa 1650 m voort te zetten. Zodoende ontstond de mogelijkheid om nog een vierde formatie in het onderzoek te betrekken en te testen, namelijk de in België succesvol gebleken Onder-Paleoceen Formatie, de Formatie van Houthem.

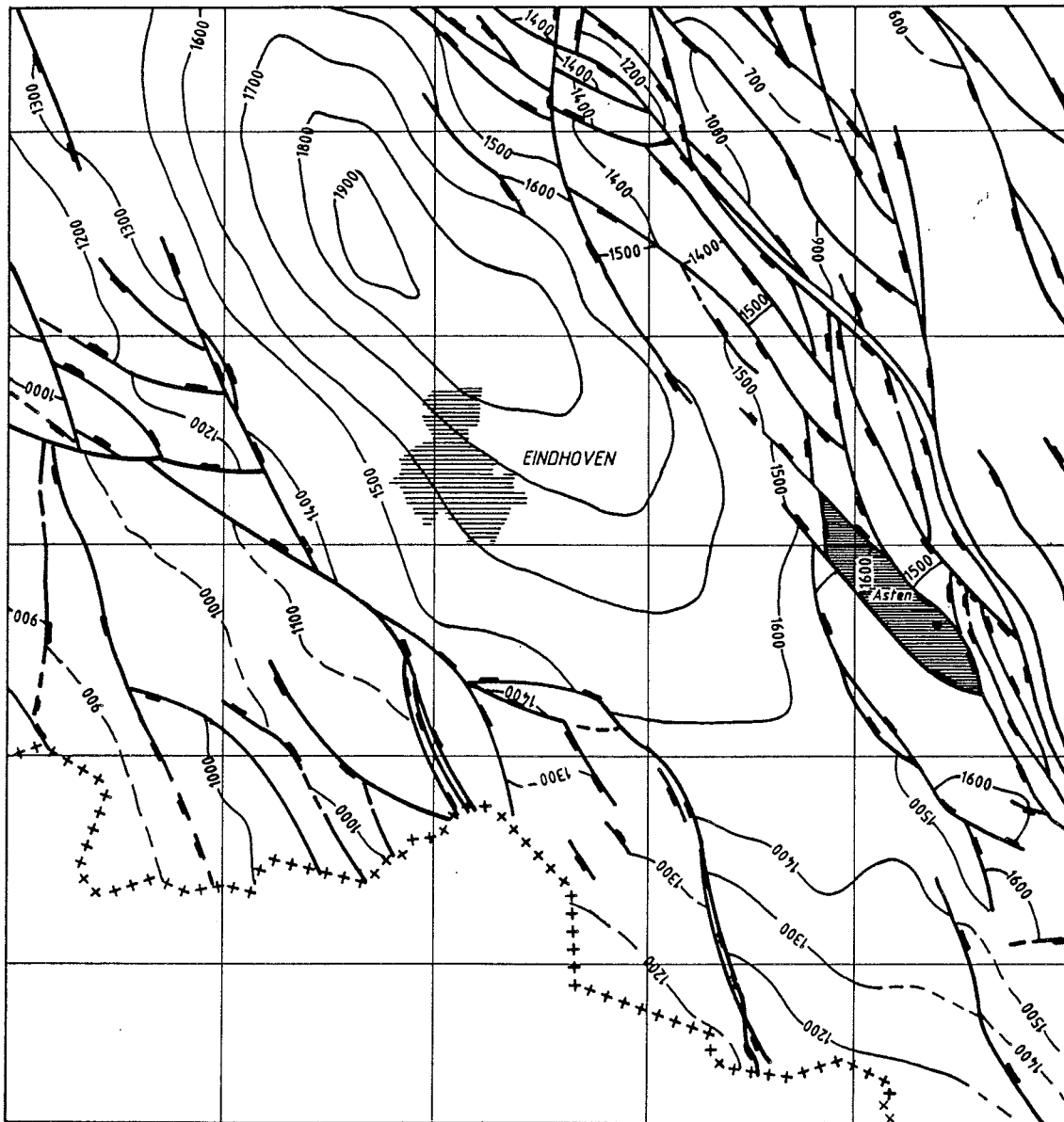
Figuur 1.2 toont de geologische prognose en het schematisch ontwerp van de proefboring. De gerealiseerde uitvoering van de boring is weergegeven in figuur 1.3.

1.3.2 Uitvoering proefboring

De uitvoering van de proefboring en het onderzoek naar de reservoirkarakteristieken van de verschillende formaties heeft plaatsgevonden gedurende twee perioden. In eerste instantie is tussen november 1986 en maart 1987 de proefboring en het geplande onderzoekprogramma uitgevoerd, inclusief een putproef op de diepst gelegen formatie; de Formatie van Houthem (1636 - 1656 m - RT*). Om de gunstige resultaten van de voorlopige reservoir evaluaties met betrekking tot het Zand van Berg te verifiëren is in tweede instantie ook op het Zand van Berg (1494 - 1513 m- RT) een produktietest uitgevoerd. Daartoe is in de periode maart-mei 1988 de boring op de desbetreffende diepte geopend en met een z.g. prepack filter afgewerkt.

Voor een overzicht van de booractiviteiten met betrekking tot de uitvoering van de proefboring en het aanboren van het Zand van Berg wordt verwezen naar respectievelijk Annex 1.1 en 1.2.

*) RT = Rotary Table; RT = 4.24 m + maaiveld, RT = 30.34 m + NAP.



Breuken en contouren basis Tertiair.

Figuur 2.1 Structuurkaart van de Centrale Slenk en ligging van het
breukblok Asten (RGD, 1982).

2. GEOLOGIE

2.1 Inleiding

Het doel van het geologisch onderzoek was het verkrijgen van betrouwbare geologische gegevens betreffende; de lithostratigrafische opbouw, de structuur en daarmee samenhangende reservoir karakteristieken van de ondergrond van het onderzoeksgebied. De resultaten van de proefboring zouden tevens benut worden om de gegevens van eerdere boringen te verifiëren.

De boring Asten-2 ligt in de oostelijke randzone van de Centrale Slenk. Deze randzone is opgebroken in een aantal kleine tektonische blokken. In figuur 2.1 zijn de breuken en de ligging van het breukblok Asten weergegeven. De Tertiaire en Kwartaire sequenties bestaan hoofdzakelijk uit klastische sedimenten die afgezet werden in mariene en fluviatiele milieus. De diepteligging van de basis van het Tertiair is in figuur 2.1 aangegeven met contourlijnen. De relatief grote diepte van de basis van het Tertiair op circa 1700 m -N.A.P. hangt samen met de structurele evolutie van de Centrale Slenk.

Het paleogeografische overzicht is gebaseerd op het werk van Keizer en Letsch (1963). Voor de lithostratigrafische beschrijving van de verschillende formaties is gebruik gemaakt van stratigrafische nomenclatuur van NAM en RGD (1980). Verder is gebruik gemaakt van de inventarisatie rapporten t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water van RGD (1982) en TNO-DGV (Schoute, 1982).

2.2 Regionale geologie

2.2.1 Paleogeografisch overzicht (Keizer & Letsch, 1963)

Boven Krijt en Paleoceen

Aan het eind van het Krijt, kwam het gehele gebied boven zeeniveau te liggen als gevolg waarvan het Boven Krijt grotendeels werd geërodeerd. De erosiefase werd gevolgd door transgressie waarna Tertiaire sedimenten werden afgezet. De mariene sedimentatie begon in een smalle westnoordwest-oostzuidoost georiënteerde zone ten noorden van het Massief van Brabant.

De mariene sedimentatie heeft zich gedurende het Paleoceen geleidelijk verder naar het noorden uitgebreid. Daling in het Peel gebied werd nog niet gekenmerkt door graben vorming.

Eoceen en Oligoceen

De mariene sedimentatie en daling zetten zich voort gedurende het Onder- en Midden-Eoceen.

Het Boven-Eoceen en het Onder-Oligoceen worden gekenmerkt door in omvang variërende hiaten. In oostelijke Noord-Brabant ligt het Onder-Eoceen (Basaal Zand van Dongen) direct onder het Midden-Oligoceen (Formatie van Rupel). Dit is het gevolg van erosie die veroorzaakt werd door de eerste belangrijke opheffing gedurende het Tertiair aan het einde van het Eoceen en het begin van het Oligoceen.

Het Midden-Oligoceen is gekenmerkt door een differentiële daling, waardoor het Peel- en West-Brabant gebied sneller daalde dan de kust gebieden.

Aan het eind van het Oligoceen en het begin van het Mioceen vond de tweede belangrijke opheffing en daarmee verbonden erosie plaats over het grootste deel van Nederland.

Mioceen en Pliocene

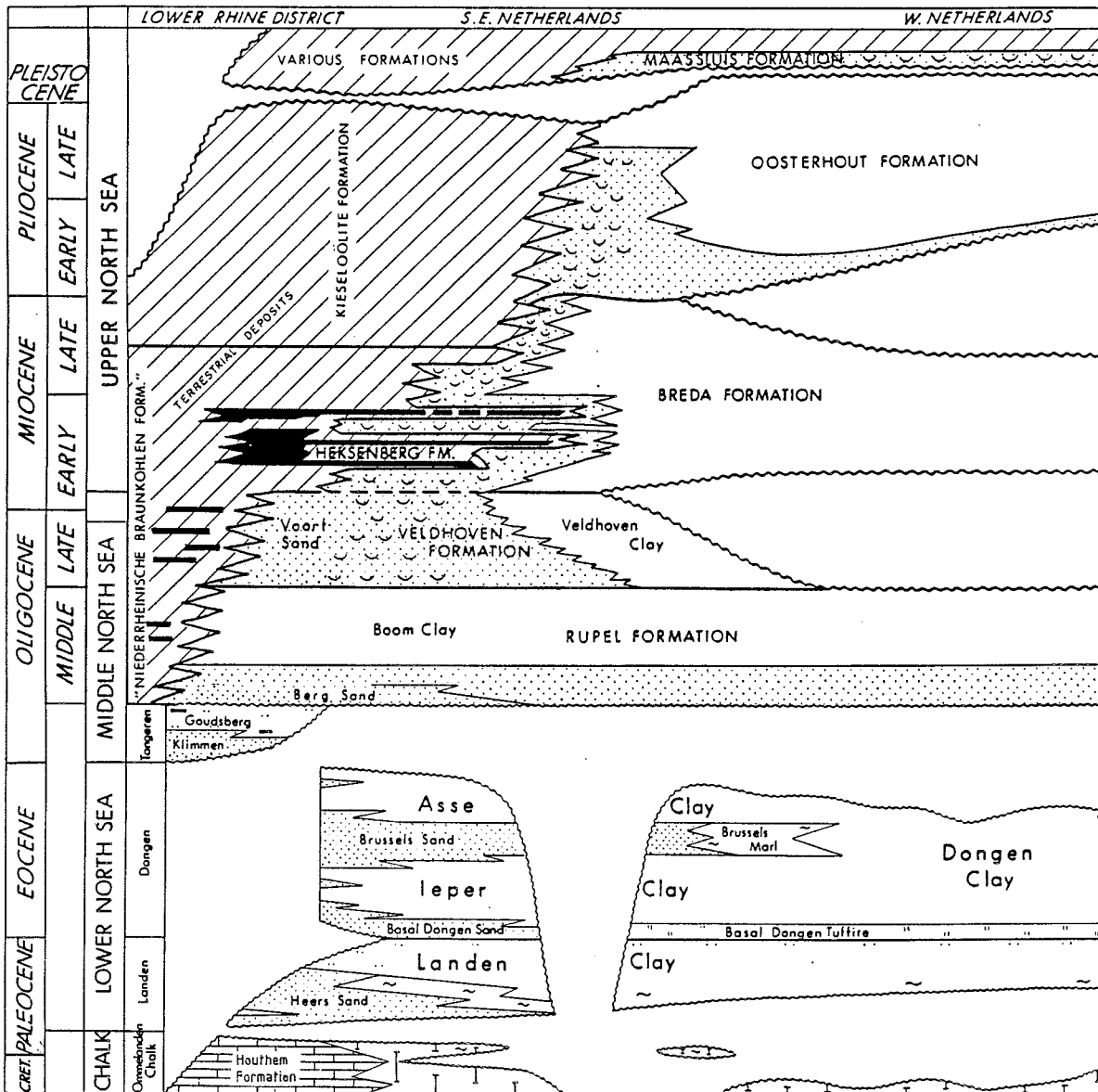
De hiaten in de Tertiaire sequentie, die veroorzaakt werden door erosie en/of non-depositie van Oligocene en Onder-Miocene sedimenten zijn niet aanwezig in oostelijk Noord-Brabant. Dit hangt samen met de daling van de Centrale Slenk (RGD, 1982).

Gedurende het Midden- en Boven-Mioceen is in Noord-Brabant een relatief dik pakket mariene- en continentale afzettingen gevormd. Dit was het gevolg van voortgaande differentiële daling (zuidoost gerichte scheefstelling) en bewegingen volgens het noordwest-zuidoost strekkende breuksysteem.

Tijdens het Pliocene werd de daling van het Centrale Slenk tijdelijk onderbroken. Alle jongere, Pliocene en Kwartaire sedimenten in dit gebied werden onder continentale condities afgezet.

Kwartair

Deze periode is gekenmerkt door de hernieuwde daling van het Centrale Slenk gebied en continentale sedimentatie.



Figuur 2.2 Lithostratigrafie van het Kenozoicum.
 (NAM & RGD, 1980)

De daling van het Centrale Slenk gebied langs het noordwest-zuidoost strekkende breuksysteem heeft geresulteerd in een totaal diepteverschil tussen de basis van het Tertiair aan weerszijden van het breuksysteem van meer dan 1000 m. De maximale diepte van de basis van het Tertiair in dit gebied bedraagt bijna 2000 m.

2.2.2 Afzettingmilieus gedurende het Kenozoicum

Uit de paleogeografische ontwikkeling blijkt dat Nederland gedurende verschillende perioden deel uitmaakte van dalende bekkens.

Gedurende het oudere Tertiair was het sedimentatiemilieu voornamelijk marien. Vanaf het Mioceen begonnen eerst in Zuidoost-Nederland continentale (fluviaatiele) condities op te treden. Pas tijdens het Kwartair had de zee zich zover teruggetrokken, dat opvulling van de bekkens grotendeels onder continentale condities plaatsvond.

2.2.3 Lithostratigrafie

Het overzicht van de lithostratigrafie van het Kenozoicum is weergegeven in figuur 2.2.

Chalk Groep

De oudste Tertiaire formatie behoort tot de Chalk Groep en heet Formatie van Houthem. De Formatie van Houthem bestaat uit witte, zachte kalksteen uit Onder-Montien (Marie, 1947) die met een gering stratigrafisch hiaat is gelegen op soortgelijke kalken van het Boven-Krijt.

Onder-Noordzee Groep

De sedimenten van deze groep zijn vrijwel overal discordant gelegen op afzettingen van de Chalk Groep. Twee formaties worden onderscheiden: Formatie van Landen (Paleoceen) en Formatie van Dongen (Eoceen). De afzettingen van deze formaties bestaan voornamelijk uit grijze kleien (soms kalkhoudend), met inschakelingen van zanden. Beiden formaties zijn onderverdeeld in een aantal subeenheden (van jong naar oud):

Formatie van Dongen, met de laagpakketten:

- Klei van Asse
- Zand van Brussel
- Klei van Ieper
- Basaal Zand van Dongen, en

Formatie van Landen, met de laagpakketten:

- Klei van Landen
- Zand van Heers

Midden-Noordzee Groep

Behalve in zuidelijk Zuid-Limburg ontbreken de Onder-Oligoceen sedimenten in vrijwel geheel Nederland. Ook de bovengrens van deze groep wordt in een groot deel van Nederland bepaald door een erosie-oppervlak.

In deze groep worden drie formaties onderscheiden: Formatie van Tongeren (Onder-Oligoceen), Formatie van Rupel (Midden-Oligoceen) en Formatie van Veldhoven (Boven-Oligoceen).

De afzettingen van deze formaties bestaan uit donkere kleien met wisselende hoeveelheden ingeschakelde zandlagen. De volgende subeenheden worden onderscheiden (van jong naar oud):

Formatie van Veldhoven, met de laagpakketten:

- Klei van Veldhoven
- Zand van Voort

Formatie van Rupel, met de laagpakketten:

- Klei van Boom
- Zand van Berg, en

Formatie van Tongeren, met de laagpakketten:

- Goudsberg Laagpakket
- Klimmen Laagpakket

Boven-Noordzee Groep

De afzettingen van deze groep liggen bijna overal in Nederland discordant op de oudere sedimenten. De top van deze groep wordt gelegd bij het huidige land/zeebodem oppervlak.

In deze groep worden drie mariene en drie terrestrische formaties onderscheiden. De mariene formaties zijn (van jong naar oud):

- Formatie van Maassluis
- Formatie van Oosterhout
- Formatie van Breda

De terrestrische formaties zijn (van jong naar oud):

- Formatie van Scheemda
- Kiezeloöliet Formatie
- Formatie van Heksenberg

De mariene afzettingen bestaan uit kleien en fijn- tot grofkorrelige zanden. De terrestrische afzettingen bestaan uit kleien, zanden en grinden, plaatselijk met voorkomens van veen- en bruinkoollagen. Jongere sedimenten zijn van glaciële oorsprong.

2.2.4 Structurele geologie

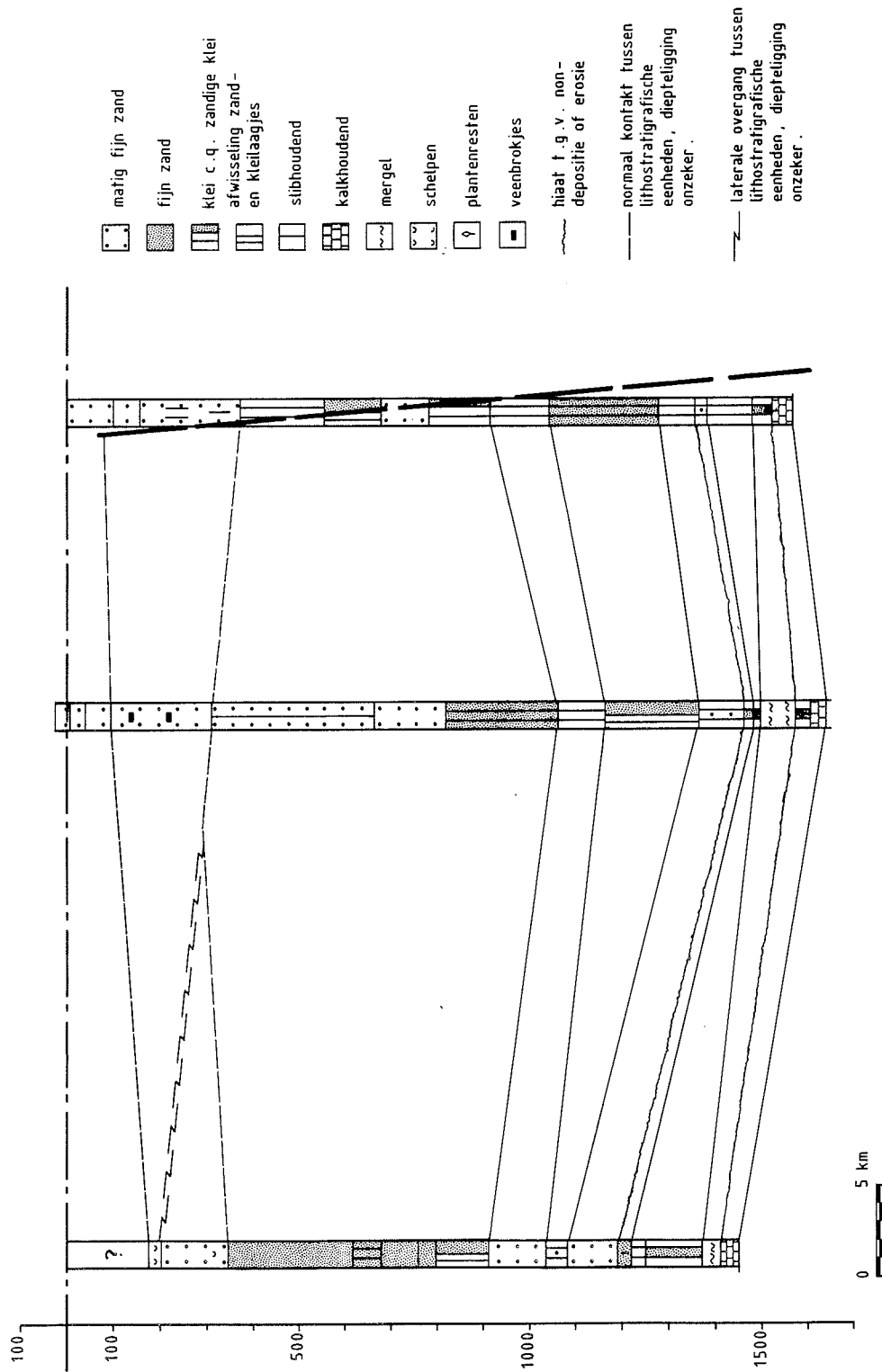
De proefboring Asten-2 ligt in de oostelijke randzone van de Centrale Slenk (zie figuur 2.1). Bewegingen volgens breuken met noordwest-zuidoost strekking begonnen op te treden in het Boven-Oligoceen (Keizer & Letsch, 1963).

Naast uit over grote lengte vervolgbare breuken (met als belangrijkste de Peelrandbreuk) bestaat dit breukensysteem uit een aantal kleinere breuken met variërend verzet. De korstgedeelten tussen deze breuken zijn in een aantal gevallen opgebroken in kleinere blokken. De boring Asten-2 ligt in een dergelijk blok. De begrenzende noordwest-zuidoost breuken liggen $2\frac{1}{2}$ kilometer uit elkaar en de afstand tussen de min of meer noord-zuid georiënteerde breuken bedraagt ongeveer 10 kilometer (zie figuur 2.1).

Met behulp van gegevens uit diepe- en ondiepe boringen en seismische informatie zijn door de Rijks Geologische Dienst kaarten met breuken en dieptecontouren van de basis van verscheidene Tertiaire formaties samengesteld (RGD, 1982). Uit deze kaarten is de orde van grootte van het verzet langs elk van de "Asten-2 blok" begrenzende breuken af te leiden.

Voor de noordelijke en oostelijke breuken bedraagt dit ongeveer 100 tot 150 meter. De dunnere reservoirs worden hier door de breukcontacten geheel afgesloten. Ook in het omvangrijke pakket van de Formatie van Breda kunnen zandniveaus door breukcontacten met kleiiger niveaus worden afgesloten.

Het verzet langs de zuidelijke breuk ligt in de orde van grootte van enkele tientallen meters. De dunnere reservoirs worden ook hier geheel afgesloten. Echter, dit geldt mogelijk slechts gedeeltelijk voor



Figuur 2.3 Schematisch geologisch (noordwest-zuidoost) profiel van de Centrale Slenk.
 (RGD, 1982)

de reservoir-trajecten van de Formatie van Breda en het Zand van Voort. Het verzet langs de noord-zuid breuk aan de westzijde van het blok is minder duidelijk af te leiden. Mogelijk is het verzet daar slechts in de orde van grootte van enkele meters. Deze breuk zou dan zelfs voor de dunnere reservoirs geen afsluitende functie hebben.

2.3 Geologie van de boring Asten-2

2.3.1 Onderzoek en methodiek

Het ontwerp van de boring en de uitvoering van het onderzoekprogramma zijn in belangrijke mate bepaald door de hoofddoelstelling van het onderzoek, namelijk het verkrijgen van betrouwbare geologische gegevens en reservoir-eigenschappen over het gehele traject van de boring. De geologische prognose die gehanteerd werd bij het ontwerp van de boring (figuur 1.1) was gebaseerd op boorgegevens van in de vijftiger jaren uitgevoerde olie exploratieboringen in de regio, de boringen Asten-1 en Nederweert. In figuur 2.3 is op basis van deze informatie en de resultaten van destijds uitgevoerd seismisch onderzoek een schematisch geologisch (noordwest-zuidoost) profiel over de Centrale Slenk weergegeven (RGD, 1982). De lithologische beschrijving van de boring Asten-2 is hierin reeds verwerkt.

Oorspronkelijk was de geplande einddiepte voorzien op 1550 m - NAP en lag het in de bedoeling om 3 op voorhand geïdentificeerde formaties te onderzoeken op hun geothermische potentieel, nl.

- de Formatie van Breda, diepte circa 940 - 1000 m -NAP;
- het Zand van Voort (Formatie van Veldhoven), diepte circa 1200 - 1400 m -NAP; en
- het Basaal Zand van Dongen (Formatie van Dongen), diepte circa 1500 - 1530 m -NAP.

Echter aan de hand van gedetailleerd onderzoek van de eerdergenoemde boorgegevens adviseerde de RGD om de boring voort te zetten tot een einddiepte van circa 1650 m -NAP. Zodoende zou de mogelijkheid ontstaan om - tegen relatief geringe meerkosten - een vierde formatie in het onderzoek te betrekken en te testen, namelijk de in België succesvol gebleken Onder-Paleoceen Formatie;

- de Formatie van Houthem, diepte circa 1630 - 1650 m -NAP.

Ondermeer omdat hiermede tevens de kans op het aanboren van meerdere daadwerkelijk geothermisch benutbare formaties aanzienlijk zou toenemen, is dit advies opgevolgd.

Het gerealiseerde boorprogramma omvatte de volgende onderzoek-activiteiten:

Bemonstering

Op regelmatige intervallen zijn op de goot vóór de trilzeef boormonsters genomen. Tot een diepte van 466 meter zijn de monsters om de 3 meter genomen (RGD-Nuenen), vervolgens zijn tot de einddiepte de monsters om de 2 meter genomen.

Ten behoeve van het onderzoek naar de samenstelling van het formatiewater (hoofdstuk 3) zijn aparte boormonsters verzameld. Het monstermateriaal bestond uit stukjes boorkernmateriaal, kluiten van de boorkop en omhooggevoerde kluiten en "klontjes" bemonsterd op de schudzeef.

Laboratoriumonderzoek ter plaatse

Op de boorlocatie was door de RGD een veldlaboratorium ingericht, met o.a. een droogoven, zeefapparatuur en microscoop etc., voor specifieke onderzoeken. Het laboratoriumonderzoek ter plaatse o.a. naar foraminiferen was met name van belang voor het nauwkeurig bepalen van de formatie overgangen.

Kernboren

Een uitgebreid kernonderzoek maakte deel uit van het onderzoekprogramma. Het kernboorprogramma omvatte de volgende trajecten

- 9 m, Formatie van Breda, direct onder Kleien van Heksenberg. Diepte afhankelijk van het verzet van de breuk tussen 800 - 880 m -NAP.
- 18 m, Top Zand van Voort direct onder Veldhoven Kleien volgens prognose 1165 - 1183 m -NAP.
- 72 m, Basis Boom Klei, gehele Zand van Berg plus top Basaal Zand van Dongen, volgens prognose 1436 - 1508 m -NAP.

Er is gekernd met 9 meter lange 4" diameter kernbuizen. De fiberglas kernbuizen werden in hanteerbare lengten van 1 meter zorgvuldig verpakt en in ingevroren toestand bewaard.

Kernonderzoek

Het kernonderzoekprogramma omvatte:

- natuurlijke gamma meting, waarmede door correlatie met de gamma-meting in het boorgat, de diepte van de desbetreffende kern of kernplug nauwkeurig kon worden bepaald (hoofdstuk 4).
- meting van de horizontale permeabiliteit (N_2) aan een geselecteerd aantal kernpluggen. Voor een aantal pluggen zijn zowel de stikstof (gas)- als de vloeistofpermeabiliteit bepaald (hoofdstuk 4, figuur 4.6).
- korrel dichtheid en porositeit bepaling (hoofdstuk 4).

Na beëindiging van de metingen aan de kernpluggen zijn deze pluggen gebruikt voor korrelgrootte analyse. De korrelgrootte analyse voor de verschillende onderzochte formaties zijn gebruikt om directe- en indirecte methode voor de bepaling van de permeabiliteit te vergelijken en te valideren (hoofdstuk 5, figuur 5.4).

Kleimineralogisch onderzoek

De Katholieke Universiteit Leuven (KUL, België) heeft het kleimineralogisch onderzoek uitgevoerd. De representatieve monsters voor dit onderzoek zijn door de RGD geselecteerd uit het kernmateriaal. De resultaten van het kleimineralogisch onderzoek zijn weergegeven in Annex 2.1.

Boorgatmetingen

In de boring Asten-2 is voor de verschillende boortrajecten een uitgebreid programma boorgatmetingen uitgevoerd (hoofdstuk 4, tabel 4.1).

De verschillende onderzoekactiviteiten hebben gezamenlijk geresulteerd in een goed onderbouwd inzicht en gedegen kennis van de litho-stratigrafische opbouw in de Centrale Slenk en in het bijzonder in het breukblok Asten.

PERIODE	TIJDVAK	GROEP (+code)	LITHOSTRATIGRAFIE		DIEPTE m (-RT)	GRENS (+code)	BIOSTRATIGRAFISCHE ZONE		
			FORMATIE	LAAGPAKKET (+code)					
KWARTAIR			VEGHEL			35			
			STERKSEL			70			
TERTIAIR	PLIOCEEN	BOVEN-NOORDZEE (NU)	KEDICHEM/ TEGELEN			125			
			KIEZELOOLIET			NUKØ			
	B. MIOCEEN		BREDA	VRIJHERENBERG LAAGPAKKET	500	NUKB	525?	indeling o.g.v. mollusken ↓ F-III zone	
			HEKSENBERG	KAKERT LAAGPAKKET	695	NUHG	724	F-V zone ? 668 Barren interzone	
			BREDA	KAKERT LAAGPAKKET	? 850	NUKB	810?	C-zone	
	M. MIOCEEN		BREDA	KAKERT LAAGPAKKET	1000	NUKB	1010	H-zone indeling o.g.v. foraminiferen ↓ FD-zone	
			O. MIOCEEN?		VELDHOVEN KLEI (NMVFØ)		1093	1110	
	chattien B. OLIGOCEEN		MIDDEN NOORDZEE (NM)	VELDHOVEN	ZAND VAN VOORT (NMVFV)		1137		FE-zone
				RUPEL			1397		FF-zone
	rupelien M. OLIGOCEEN		ONDER- NOORDZEE (NL)	DONGEN	BERG ZAND (NMRFS)	1494	1513,5	1497	niet interpr.
	landenien b. heersien o. heersien b. montien o. montien			LANDEN	BASAAL ZAND v. DONGEN (NLLFFD) LANDEN KLEI s.s. (NLLFC) mergel HEERS ZAND s.s. (NLLFS) limnisch	1586 1607	1530,5 NLLF	1543 1616	FJ-zone
			CHALK (CK)	HOUTHEM			1639 1673	CKHM	FJ-naval ?

Figuur 2.4 Stratigrafisch schema van de boring Asten-2.

2.3.2 Stratigrafie

Het stratigrafisch schema van de boring Asten-2 is weergegeven in figuur 2.4. De lithostratigrafische opbouw van het Kenozoïcum, zoals deze is beschreven in paragraaf 2.2.2, wordt in de boring grotendeels aangetroffen.

Het hiaat in de Onder-Noordzee Groep tussen het Basaal Zand van Dongen en het Zand van Berg is het gevolg van erosie en/of non-depositie tijdens het Boven-Eoceen/Onder-Oligoceen.

Van de mariene Midden-Noordzee Groep zijn de Rupel Formatie en de Veldhoven Formatie aangetroffen. De grens tussen de Midden-Noordzee Groep (Klei van Veldhoven) en de Boven-Noordzee Groep (Formatie van Breda) is niet scherp. Dit is het gevolg van min of meer continue sedimentatie gedurende het Onder-Mioceen.

De sedimenten van de Boven-Noordzee Groep zijn, met uitzondering van de Formatie van Breda (marien milieu), onder continentale condities afgezet.

2.3.3 Lithologische beschrijving van de formaties

De lithologieën van de verschillende lithostratigrafische eenheden zijn beschreven in volgorde van beneden naar boven.

Diepten worden hier gegeven in meters beneden de boorvloer (RT). De boorvloer lag op 30.34 boven N.A.P. en 4,24 m boven maaiveld. De getallen achter de formatienaam, geven het diepte-interval aan.

Formatie van Houthem (1639 m - einddiepte)

Deze formatie bestaat uit grotendeels zachte, witte- tot lichtgrijze/geelgrijze, fijn- tot grofkorrelige kalksteen. Een deel van de korrels bestaat uit onbepaald bioklastisch materiaal en uit brokjes kristallijn calciet. Voornamelijk bovenin komen geringe hoeveelheden matig gepreserveerde fossielfragmenten voor. Beneden 1665 m -RT is de formatie harder; het boorgruis bestaat hier voornamelijk uit grovere witte en lichtgrijze kalksteenbrokjes. Pyriet is steeds sporadisch aanwezig. Tijdens de pompproeven aansluitend op de boorfase, is zand uit deze formatie opgepompt. Dit bestaat uit goed gesorteerde, afgeronde, matig grove korrels transparante kwarts ($\pm 75\%$) en donkere kleisteen. Aangenomen wordt dat dit zand afkomstig is uit het karststelsel bovenin deze formatie, waarin het zand tijdens of na de verkarstingsfase is terecht gekomen.

Formatie van Landen: Zand van Heers (1607 -1639 m)

In dit laagpakket worden afzettingen van limnische (zoetwater)- en mariene herkomst aangetroffen. De onderste, limnische afzettingen bestaan uit een laag (± 5 m) donkere roodgrijze kleien en, hierop afgezet humeuze zanden (± 8 m). Deze bevatten plaatselijk wat bruinkool en plantenresten en inschakelingen van pyriethoudende donkere klei/kleisteen. Hierop liggen ondiepe mariene afzettingen. Deze bestaan uit deels kalkige, donkergrijze kleistenen en groengrijze, zeer fijnkorrelige glauconiethoudende zanden.

De bovengrens van dit laagpakket is gelegd (in navolging van NAM & RGD, 1980) bij de overgang van deze zanden naar de mergels van de Klei van Landen.

Formatie van Landen: Klei van Landen (1530,5 - 1607 m)

Dit laagpakket is te scheiden in twee gedeelten. Het onderste deel zou "Mergel van Landen" genoemd kunnen worden. Onderin komt een laag (± 3 m.) donkere, kalkige kleisteenvoor; daarop liggen bruingrijze, zandige, sterk kalkige kleien en kleistenen met soms veel fijnkorrelige, lichtgele kalkconcreties en pyriet.

Het bovenste deel van de Klei van Landen bestaat uit donkergroengrijze, siltige, soms licht kalkige kleien en schalies met glauconiet en pyriet.

De bovenste meters van dit laagpakket wordt aangetroffen in kern 11 en 10//0-3.

De geleidelijke overgang van de Klei van Landen naar het Basaal Zand van Dongen wordt aangetroffen in de kern-gedeelten 10/4 en volgende.

Formatie van Dongen: Basaal Zand van Dongen (1513,5 - 1530,5 m)

Het onderste deel van dit laagpakket bestaat uit donkere, blauwig groengrijze, siltige, glauconiethoudende schalies. Daarop liggen donkere blauwgrijze, siltige tot uiterst fijnkorrelige, glauconiethoudende zanden met pyriet (fijne brokjes en kokertjes; beide worden naar boven toe grover en komen overvloediger voor.

De scherpe bovengrens met de Formatie van Rupel wordt aangetroffen in kern 9//6.

Formatie van Rupel: Zand van Berg (1494 - 1513,5 m)

Dit laagpakket bestaat uit donkergrijsgroene, zeer fijnkorrelige, siltige, glauconiethoudende zanden, die naar boven sterker siltig en kleiig worden. Onder in het laagpakket is in beperkte hoeveelheden bruinkool waargenomen (kern 8//1 en 2).

De geleidelijke overgang naar de Klei van Boom is aangetroffen in het onderste deel van kern 7 (//0-2).

Formatie van Rupel: Klei van Boom (1397 - 1494 m)

Dit laagpakket bestaat uit donkergrijsbruine, taaie, siltige en soms fijnzandige kleien en kleistenen met inschakelingen van zandige niveaus. In het boorgruis zitten brokjes en fijne kokertjes pyriet. Het boorgruis uit de bovenste deel van het laagpakket bevat soms veel wit, structuurloos kalkgruis. Beschrijvingen van ontsluitingen in België vermelden hierin het voorkomen van pyrietknollen en kalkseptariën.

De bovengrens is gelegd op 1397 m-RT, vanaf welke diepte tijdens de boring taaie kleien werden aangeboord waarin veel fijn kalkgruis (septariënkalk(?)) werd aangetroffen. De bovenste ± 20 m met veel siltige- en zandige inschakelingen vormt een zeer geleidelijke overgang naar de Formatie van Veldhoven. De grens tussen Midden- en Boven-Oligoceen werd gelegd op grond van foraminiferen.

Formatie van Veldhoven: Zand van Voort (1196 - 1397 m)

Dit laagpakket bestaat uit donkergroengrijze en bruingrijze, fijne tot uiterst fijne kleiïge zanden en zandige kleien/silten, met variërende gehalten aan glauconiet en kleurloze glimmer. Het laagpakket is gekenmerkt door fossielrijke niveaus.

De bovengrens is gelegd onder een meters-dikke kleilaag, die de basis vormt van de Klei van Veldhoven.

Formatie van Veldhoven: Klei van Veldhoven (1093 - 1196 m)

Dit laagpakket bestaat onderin uit een afwisseling van bruingrijze, zandige tot siltige kleien en kleiïge tot siltige zanden, met weinig glauconiet en kleurloze glimmer. Naar boven toe nemen de ingeschakelde zandlagen in dikte en aantal af. De bovenste helft van het laagpakket bestaat nog voornamelijk uit taaie, groengrijze, zandige tot siltige kleien. Mariene fossielen worden in het gehele laagpakket aangetroffen.

De overgang naar de bovengelegen Formatie van Breda verloopt zeer geleidelijk. Op grond van een toename van het zand- en glauconietgehalte is hier de grens gelegd bij een diepte van 1093 m-RT.

Formatie van Breda (\pm 850 - 1093 m en 340 - 695 m)

De Formatie van Breda is in twee laagpakketten gedeeld door intervingerende afzettingen van de Formatie van Heksenberg. Het onderliggende Kakert Laagpakket en het bovenliggende Vrijherenberg Laagpakket bestaan uit donkergrijsgroene en bruingeel, zeer fijne tot matige fijne zanden. Het glauconietgehalte in deze zanden is soms zeer hoog.

Verder komen in deze formatie zandige kleilagen voor. De formatie is rijk aan fossielen. De onderste \pm 200 m van de formatie is sterk kleiig; naar boven toe neemt het kleigehalte geleidelijk af. Het bovenste deel van de formatie vertoont echter weer toename van het kleigehalte. De overgang naar de Kiezeloöliet Formatie wordt bepaald door afname van de glauconiet en toename van de korrelgrootte en het kwartsgehalte.

Formatie van Heksenberg (695 - \pm 850 m)

Deze formatie bestaat uit witte en grijze, fijne tot matig grove, kwartsrijke zanden met inschakelingen van bruine, humeuze zanden en van vijf dunne bruinkoollagen.

De grenzen van deze formatie worden bepaald door de lithologische verschillen met de Formatie van Breda. De bovengrens is duidelijk, maar de positie van de ondergrens kon, ten gevolge van sterke naval tijdens het boren, niet precies worden aangegeven.

Kiezeloöliet Formatie (\pm 175 - 340 m)

De afzettingen van deze formatie bestaan uit witte en lichtbruine, matig fijne tot uiterst grove, kwartsrijke zanden en grinden, afgewisseld met compacte, zandige kleien. De kleien bevatten vaak veel organisch materiaal. Inschakelingen van veen en bruinkool komen ook voor.

De formatie wordt bedekt door Kwartaire sedimenten, waarvan de zanden duidelijk verschillende, bont-gekleurde mineraalsamenstellingen hebben. Ten gevolge van sterke uitspoeling van het boorgat in het hogere

traject is bij de gebruikte boormethode de positie van de bovengrens slechts bij benadering aan te geven.

Kwartaire formaties (oppervlakte - \pm 175 m)

Onderscheid tussen de Formatie van Tegelen, Formatie van Kedichem, Formatie van Sterksel en Formatie van Veghel wordt gemaakt op grond van verschillen in mineraalsamenstellingen. Grenzen in figuur 2.4 konden hier om eerder genoemde redenen slechts bij benadering worden aangegeven.

2.4 Resumé

De boring Asten-2 ligt in de randzone van de Centrale Slenk, die opgebroken is in een aantal kleine tektonische blokken.

De Tertiaire en Kwartaire sequenties bestaan uit kalkstenen en klastische sedimenten.

Gedurende het oudere Tertiair, was het sedimentatiemilieu voornamelijk marien. Vanaf het Mioceen begonnen continentale condities op te treden. De continentale condities breidden zich gedurende het Kwartair uit.

De hiaten in de Tertiaire sequentie werden veroorzaakt door erosie en/of non-depositie tijdens het Boven-Eoceen, Onder-Oligoceen, Boven-Oligoceen en Onder-Mioceen.

De relatief grote diepte van de basis van het Tertiair (\pm 1700m -N.A.P.) hangt samen met de structurele evolutie van de Centrale Slenk. Het breukensysteem bestaat uit noordwest-zuidoost strekkende breuken met variërend verzet. Voor de noordelijke en oostelijke breuken bedraagt dit ongeveer 100 tot 150 m. De dunnere reservoirs worden hier door de breukcontacten geheel afgesloten.

De lithostratigrafische opbouw van het Kenozoicum, zoals deze is beschreven in de regio, wordt in de boring Asten-2 grotendeels aangetroffen.

Het hiaat in de Onder-Noordzee Groep (tussen Basaal Zand van Dongen en Zand van Berg) is het gevolg van erosie/non-depositie tijdens het Boven-Eoceen/Onder-Oligoceen.

Van de mariene Midden-Noordzee Groep zijn de Formatie van Rupel en de Formatie van Veldhoven aangetroffen. De grens tussen de Midden-Noordzee Groep (Klei van Veldhoven) en de Boven-Noordzee Groep (Formatie van

Breda) is niet scherp. Dit is het gevolg van min of meer continue sedimentatie gedurende het Onder-Mioceen.

De sedimenten van de Boven-Noordzee Groep zijn, met uitzondering van de Formatie van Breda (marien milieu), onder continentale condities afgezet.

3 HYDROGEOCHEMIE

3.1 Inleiding

Het hydrogeochemisch onderzoek is uitgevoerd door het Instituut voor Aardwetenschappen*) van de Rijksuniversiteit Utrecht. Het onderzoek had betrekking op de volgende vier onderwerpen:

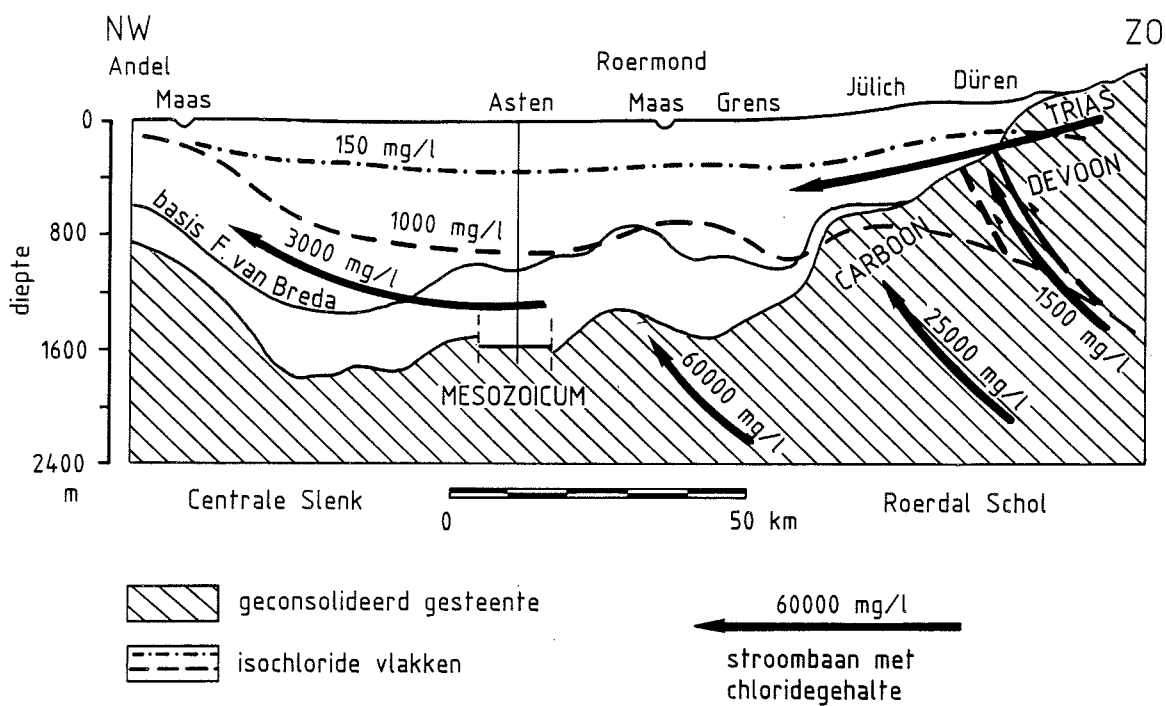
- Regionale hydrogeologie;
- Chemische samenstelling van het formatiewater;
- Chemisch evenwicht van formatiewater met betrekking tot "scaling";
- Toetsing van de samenstelling van het formatiewater uit het Zand van Berg aan de "Duitse Normen voor Heilwasser".

Aan de hand van een hydrogeologisch profiel over Asten wordt de regionale hydrogeologie geschetst teneinde de chemische samenstelling en de herkomst van het formatiewater te kunnen verklaren. Met gegevens uit sedimentonderzoek is een saliniteitsprofiel over de totale diepte van de boring geconstrueerd, waarmee bekeken is of er in de ondergrond van Asten verzoetings-, dan wel verziltingsprocessen optreden.

De belangrijkste aspecten van het onderzoek zijn evenwel; de analyse van de chemische samenstelling van water uit respectievelijk de Formatie van Houthem en het Zand van Berg; het opstellen van een chemisch model voor de herkomst van het formatiewater en de thermodynamische berekeningen van het chemisch gedrag van het water in de technische installaties met betrekking tot de te verwachten hoeveelheid "scaling" bij eventuele exploitatie van aardwarmte uit de beide onderzochte formaties. Mede in verband met de toenemende belangstelling voor recreatieve- en therapeutische thermale baden is de samenstelling van het formatiewater uit het Zand van Berg getoetst aan de normen voor geneeskrachtig mineraalwater zoals deze in Duitsland van kracht zijn.

Het veldwerk voor het hydrogeochemisch onderzoek is tijdens vijf verschillende stadia van de uitvoering van de proefboring en het testprogramma uitgevoerd.

*) Afdeling Geochemie.



Figuur 3.1 Hydrogeologisch profiel over Asten.

- Bemonstering ten behoeve van het sedimentonderzoek naar vocht- en chloridegehalte - traject 320 - 1646 m - RT gedurende de uitvoering van de proefboring, november 1986 - februari 1987;
- Monstername formatiewater tijdens de ontwikkeling van de Formatie van Houthem, februari 1987;
- Monstername formatiewater tijdens de ontwikkeling van het Zand van Berg, maart 1988 (eerste poging);
- Aanvullend sedimentonderzoek gedurende "side track"-operatie, april 1988;
- Monstername formatiewater uit het Zand van Berg tijdens de ontwikkeling van de inmiddels gedeveeerde put, mei 1988.

3.2 Hydrogeologie

Met de beschikbare gegevens kan de regionale geohydrologie slechts globaal worden weergegeven. In figuur 3.1 is een hydrogeologisch profiel weergegeven, georiënteerd volgens de meest waarschijnlijke stroomrichting van het diepe grondwater. Men gaat er van uit dat de aanvoer van het diepe grondwater vanuit het zuidoosten plaatsvindt.

De gegevens voor dit profiel zijn ontleend aan Michel (1963), Balke (1974), Kimpe (1976) en Van Doorn et al. (1985). Het profiel doorsnijdt de Centrale Slenk (een bekken opgevuld met Tertiair sediment) en de Roerdal Schol ten zuiden van de Centrale Slenk. Het profiel ligt dichtbij de oostelijke grens van de Slenk. In de aangrenzende Peelschol liggen de oudere geconsolideerde gesteenten in een hogere positie. Het zoute water in dit gesteente wordt gedraineerd door de Centrale Slenk. Dit geldt met name voor het profieldeel Asten-grens. In het vaste gesteente is thermaal formatiewater aanwezig. Het zoutgehalte van dat water neemt in noordwestelijke richting toe. Dit water kwelt via spleten en verkarste zones omhoog en stroomt uit in het Tertiaire dek van de Centrale Slenk en de Erftschol. Het zoute kwelwater wordt meegevoerd en verdund door infiltrerend water. Gedurende de geologische geschiedenis hebben verzilting (kwel) en verzoeting (inzijging) elkaar afgewisseld. In de Centrale Slenk liggen het 'zoet-zout' grensvlak (150 mg/l chloride) en het 1000 mg/l isochloride grensvlak - in diepte - honderden meters uit elkaar. In Asten bedraagt deze afstand iets minder

<u>Diepte</u> onder boortafel (m)	<u>Vocht- gehalte</u> nat monster (gew.%)	<u>Chloride gehalte</u> formatie- water (mg/l)
320	24,0	150
363	24,0	400
630	27,9	1300
711	24,0	700
795	24,0	600
800	24,0	900
805	24,0	700
810	24,0	500
817	24,0	700
824	24,0	800
880	24,0	600
904	21,8	6100
905	28,9	5000
980	18,0	800
997	18,0	1400
1023	18,0	4000
1125	24,6	8500
1140	18,0	2500
1231	16,0	18 000
1240	15,7	45 200
1245	16,0	33 800
1425 *	19,0	14 285
1429	14,0	5400
1430 *	17,0	13 650
1435 *	17,7	9485
1440 *	18,3	11 305
1445 *	19,2	11 030
1450	14,0	29 500
1465	14,0	5000
1470	26,6	4300
1470	21,6	14 400
1475 *	22,8	8420
1480 *	25,0	6945
1482 *	25,0	12 220
1484	13,0	18 300
1492	11,0	21 700
1510	16,4	21 000
1514	17,5	25 500
1521	12,7	24 600
1522	13,6	34 700
1532	11,2	26 500
1646	13,6	27 600

* sedimentmonsters verzameld in 1988.

Tabel 3.1 Vochtgehalten van het sediment en chloridegehalten van de formatiewaters.

dan 700 m. Het 'zoet-zout' grensvlak ligt in Asten op circa 320 m diepte.

In het uiterste noordwesten van het profiel (omgeving van Andel) neemt de dikte van het ongeconsolideerde sediment af en wordt als gevolg van het opwellen van water uit de diepere delen van het tertiaire dek, zout water dicht onder het oppervlak aangetroffen. Het gevolg is dat in dat kwelgebied de zoet-zout grens en de 1000 mg/l chloridegrens praktisch samenvallen en dicht aan de oppervlakte liggen.

In figuur 3.1 kan men zien dat het diepe grondwater niet zozeer gebonden is aan een sediment- of gesteentelaag; het water stroomt zelfs door sediment met een zeer geringe doorlatendheid.

Het water in de Formatie van Houthem komt voor in de overgang van ongeconsolideerd sediment naar vast gesteente en zal dus een mengwater zijn, met daarin een belangrijk aandeel van de diepe kwel. Ook in het water in het Zand van Berg is dit aandeel belangrijk.

3.3 Methoden

3.3.1 Monsternamen

Het is doorgaans moeilijk om bij boringen goede gegevens te verkrijgen over de samenstelling van de diepe formatiewaters. Slechts in incidentele gevallen wordt water geproduceerd en dan nog pas als de einddiepte bereikt is. Met behulp van de S.P. log kan de 'zoet-zout' grens (150 mg/l chloride) redelijk nauwkeurig vastgesteld worden. In het geval van zoute formatiewaters en slecht bekende formatie-weerstanden is het zoutgehalte van het poriënwater met behulp van deze methode, met name in kleiige afzettingen, niet meer te schatten. Poriënwateronderzoek aan sedimentmonsters kan die leemten in de informatie opvullen (Zuurdeeg et al., 1987).

Het voor dit onderzoek bruikbare monstermateriaal bij de boring Asten-2, bestond uit:

- a. monsters van in bevroren toestand bewaarde kernen;
- b. aan de roller bit en stabilisator vastzittende kluiten;
- c. 'klontjes' bemonsterd op de trilzeef en stukjes bruinkool.

In deze volgorde nam de kwaliteit van de monsters af.

Van de monsters werd het vochtgehalte (poriënvolume) bepaald door drogen en wegen; het poriënwater in de monsters werd geëxtraheerd met gedestilleerd water. De oorspronkelijke chloridegehalten werden berekend aan de hand van de vochtgehalten van het sediment en de chlorideconcentraties van het waterig extract.

De produktietest van de Formatie van Houthem is uitgevoerd met het luchtliftsysteem. Bij het testen van het Zand van Berg heeft er tweemaal een ontwikkeling van de put plaatsgevonden: bij de eerste ontwikkeling werd gebruik gemaakt van luchtlift met perslucht, de tweede keer werd gebruik gemaakt van stikstof als gaslift.

Gedurende de ontwikkeling van de put werd formatiewater bemonsterd aan de putmond en werden regelmatig de temperatuur, de elektrische geleidbaarheid (Ec) en de pH van het water gemeten. Voor de bemonstering van formatiewater uit de Formatie van Houthem was een z.g. "bottom-hole" sample beschikbaar. De monsters werden, afhankelijk van de te analyseren component, in het veld voorbehandeld voor analyse (Zuurdeeg et al., 1987).

3.3.2 Chemische Analyse

Het poriënwater uit de sedimentmonsters is geanalyseerd op chloridegehalte. Van de watermonsters zijn in het veld de pH, Eh, Ec en de temperatuur T gemeten. Met de z.g. Gran-Plot methode werd de alkaliteit (bicarbonaat) bepaald. De overige analyses zijn gedaan aan in het veld voorbehandelde monsters.

De voorbehandelde monsters zijn vervolgens in het laboratorium van het Instituut voor Aardwetenschappen van de Rijksuniversiteit Utrecht geanalyseerd. De gevolgde analysemethoden zijn:

ICP (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry): Sr, Pb, Cd, Co, Ba, B, Mn, Fe, P, S, Mg, Si, Na, Mo, Al, Ca, Zn, Cu, Li, K, Cr. Deze monsters zijn gecorrigeerd naar een zeewater standaard.

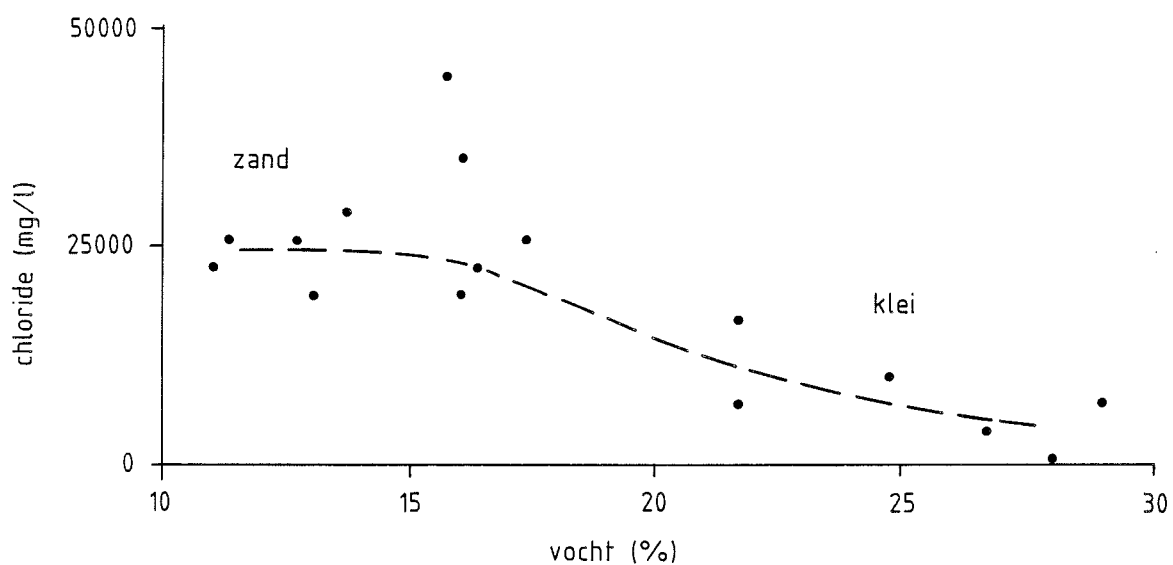
Ion-selective elektroden: jodide, fluoride

Gran-Plot methode: alkaliteit

AAS met hydride systeem: arseen

Titrimetrische bepaling met elektrochemisch eindpunt: chloride.

De analyses van bromide en ammonium zijn verzorgd door het KIWA te Nieuwegein.



Figuur 3.2 Vochtgehalte van sedimenten en chloridegehalte van het poriënwater.

3.3.3 Thermodynamische berekeningen

Met behulp van thermodynamische berekeningen is het mogelijk om aan te geven hoeveel neerslag van zouten er maximaal kan optreden in de technische installaties. Ook kan aangegeven worden hoe de vorming van deze neerslagen voorkomen kan worden.

De evenwichtsligging van chemische reacties kan berekend worden met behulp van de evenwichtsconstanten (K) voor deze reacties. Deze evenwichtsconstanten zijn echter getabelleerd voor een temperatuur van 25 °C, een druk van 1 bar en een oneindig verdunde oplossing en moeten dus gecorrigeerd worden voor temperatuur, druk en samenstelling van de oplossing.

De temperatuurcorrecties zijn berekend met een op WATEQF (Truesdell and Jones, 1974) gebaseerd computerprogramma, dat later is aangevuld met gegevens van Ball et al. (1980), Dickson and Whitfield (1981) en Millero and Schreiber (1982). Omdat met WATEQF geen drukcorrecties van evenwichtsconstanten kunnen worden berekend, wordt er van uitgegaan dat bij volledig waterige evenwichten tot een druk van 500 bar geen drukcorrectie noodzakelijk is (Parkhurst et al., 1980).

Een apart programma is ontwikkeld dat, in geval van oververzadiging, met behulp van de uitkomsten van het WATEQF programma, de hoeveelheid neerslag berekent voor watersamenstellingen van het type Asten-2.

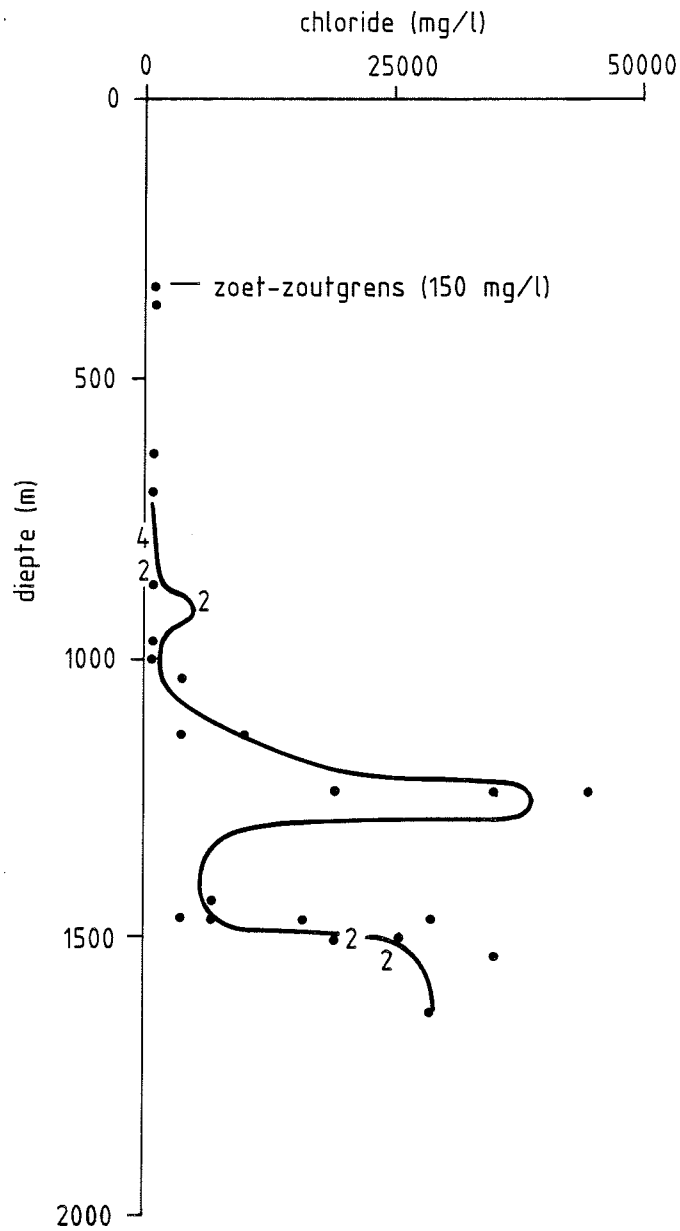
3.4 Resultaten poriënwateronderzoek

Het onderzoek aan het sediment heeft twee soorten gegevens opgeleverd:

1. de vochtgehalten en
2. de chloridegehalten van de poriënwaters.

De waarden van die twee variabelen zijn gegeven in tabel 3.1.

Van de monsters waarvan de vochtgehalten niet door schatting zijn bepaald en ook geen correctie behoeften, zijn de vochtgehalten en de chloridegehalten gegeven in figuur 3.2. De lage vochtgehalten zijn bepaald aan de kernstukken uit de zandige intervallen, terwijl de hogere vochtgehalten gelden voor de kleien. De kleien zijn minder doorlatend dan de zandige sedimenten. Combineert men dit met de chloridegehalten dan blijkt dan in de kleien brak water aanwezig is,



Figuur 3.3 Chloridegehalte van het formatiewater.

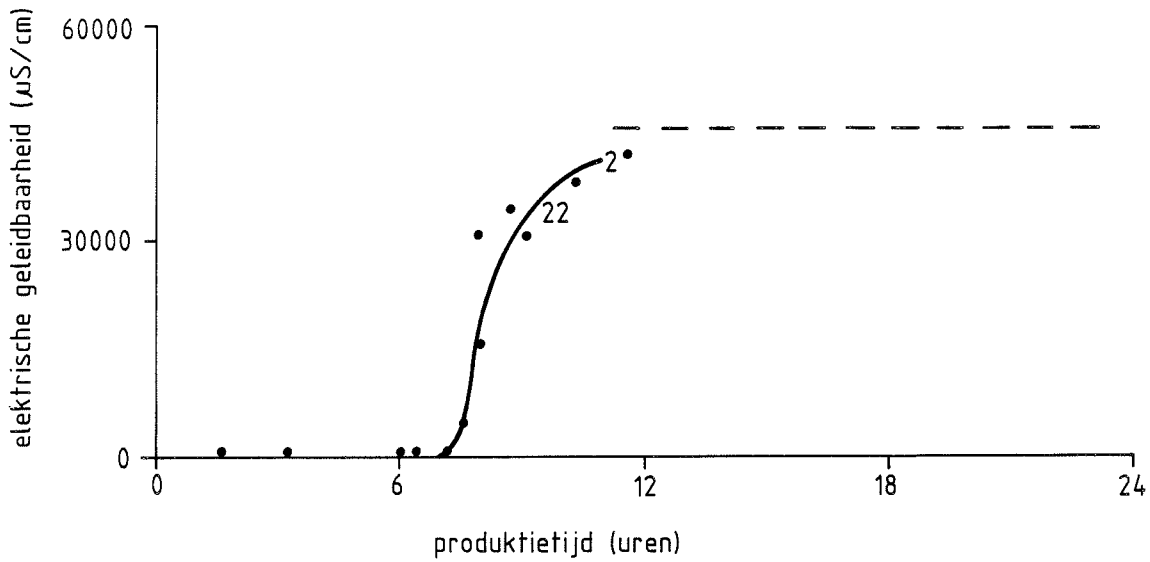
terwijl het formatiewater in de zandige sedimenten zout is. Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat in de diepe ondergrond van Asten nu een verzilting optreedt vanuit de zandige lagen, terwijl in een voorafgaand stadium de gehele ondergrond, zowel de zandige als de kleiige lagen, verzoet is geweest.

In figuur 3.3 zijn de chloridegehalten van de poriënwaters in de sedimenten uitgezet tegen de diepte. Aanvullende chloridegehalten zijn overgenomen uit van Doorn et al. (1985) of zijn beschikbaar gesteld door de N.V. Waterleidingmij. Oost-Brabant. Aangezien chloride het belangrijkste bestanddeel is van de waters onder de zoet-zout grens, is deze curve representatief voor de totale gehalten aan opgeloste stof (vnl. natrium-chloride). Er zijn vier conclusies te trekken uit de curve.

1. Indien de minima verbonden worden krijgt men een indruk van het zoutgehalte van het poriënwater uit de vroegere verzoetingsfase;
2. De maxima duiden op de mate van de huidige verzilting van de zandige lagen en de invloed van de verzilting op de minder doorlatende aangrenzende sedimenten die nog brak water bevatten;
3. De zoet-zoutgrens ligt op een diepte van ca. 320 m. Het zoutgehalte van het diepe grondwater neemt echter pas duidelijk toe vanaf een diepte van ca. 900 m;
4. Het water dat de huidige verzilting veroorzaakt, is aanmerkelijk zouter dan zeewater (Cl zeewater = 19 300 mg/l).

3.5 Resultaten produktie test

De Ec waarden gemeten tijdens de produktietest van de Formatie van Houthem zijn gegeven in figuur 3.4. In de figuur is duidelijk te zien dat na acht uur produceren met een debiet van ca. 4 m³/uur, ook daadwerkelijk formatiewater meegeproduceerd wordt. Op het moment dat gestopt werd met de produktietest werd er nog steeds een mengwater geproduceerd. Daarom is afgezien van monsternamen aan de putmond.



Figuur 3.4 Verandering van de chemische samenstelling tijdens de ontwikkeling van de put.

<u>Produktietijd</u> <u>in uren</u>	<u>Ec</u>	<u>T</u>	<u>pH</u>
0,00	22 000	26,3	10,60
0,08	20 700	21,3	
0,25	32 500	21,8	
0,33	36 400	21,4	4,95
0,50	46 600	20,7	
0,58	52 500	20,0	4,60
0,67	53 300	20,6	
0,75	54 000	21,1	4,70
0,92	56 400	19,1	
1,17	59 300	24,9	
1,25	58 900	24,2	4,80
1,50	59 600	26,5	
1,58	59 800	25,5	
1,67	63 700	18,1	
2,75	62 700	35,5	4,95
4,83	56 600	41,1	5,80
5,75	52 600	33,3	3,30

Tabel 3.2 Ec, temperatuur en pH van het produktiewater.

Tabel 3.2 geeft het verloop van Ec, T en pH tijdens de produktietest van het Zand van Berg. De veranderingen van deze parameters in de tijd wijzen erop dat er behalve formatiewater ook nog resten boorspoeling en zuurresten (pH!) meegeproduceerd werden. Het grillige verloop van de temperatuur van het uitstromende water is te wijten aan afkoeling door de overgang van vloeibaar stikstof naar gasvormig stikstof. Er mag verwacht worden dat de uiteindelijke samenstelling van het formatiewater niet veel zal afwijken van het water dat nu is geproduceerd. Om een stabiele samenstelling te bereiken zal er echter nog langdurig gepompt moeten worden.

3.6 Samenstelling formatiewater

3.6.1 Formatie van Houthem

De complete chemische analyse van het water uit de Formatie van Houthem is gegeven in Annex 3.1. In tabel 3.3 is een overzicht van de belangrijkste componenten weergegeven. Het water is zouter dan zeewater. Er zijn twee mogelijke oorzaken voor het hoge zoutgehalte:

- 1. 'zelfconcentrering' of 'membraanconcentrering';
- 2. uitloging van zoutlaagjes of menging met water dat in contact heeft gestaan met steenzout.

De gehalten aan calcium, magnesium en strontium duiden op interactie van het water met een carbonaatgesteente dat dolomitisch is en anhydriet of gips bevat. Het relatief hoge gehalte aan fluoride is het gevolg van de oplossing van het mineraal fluoriet, dat op diaklaasvlakken en laag- en breukvlakken in kalksteen kan voorkomen.

Lithium, jodide en boorzuur duiden op interactie van het water met kleien en organisch materiaal (bitumina) in een evaporitisch milieu. Het hoge gehalte aan boorzuur wijst er bovendien op dat dit milieu gevoed is met water dat een vulkanisch gebied draineerde.

Van het bromidegehalte is bekend dat het hoger wordt naarmate de ouderdom (lees: consolidatiegraad) van het aquifergesteente hoger wordt en verder met de totale hoeveelheid opgeloste stof, vooral wanneer de calcium-, magnesium- en chloridegehalten van het water toenemen (Voigt, 1977). De bromidegehalten die te Asten gemeten zijn passen heel goed bij de consolidatiegraad van de aquifers (Collins, 1975).

Het lage sulfaatgehalte duidt op een oorspronkelijk extreme sulfaat-reductie door contact van het water met organisch materiaal. De extreme sulfaatreductie en een berekende pH van 6,25 duiden erop dat de in het veld gemeten Eh (+ 176 mvolt) en pH (7,15) te hoog zijn als gevolg van contaminatie van het formatiewater met resten boorspoeling, waarvan de Eh +400 tot +600 mvolt en de pH 10-12 bedraagt. Dat betekent dat zelfs het bottom-hole sample geen zuiver formatiewater bevatte.

Alleen in water met een zo laag sulfaatgehalte kan het bariumgehalte de waargenomen hoge concentratie bereiken (bariumsulfaat is uiterst onoplosbaar).

Het gezamenlijke gehalte van kooldioxide en bicarbonaat is relatief laag. Dit duidt erop dat er geen kooldioxide vanuit de diepe ondergrond naar de Formatie van Houthem diffundeert. Het wijst er bovendien op dat het oorspronkelijk ongetwijfeld hogere CO₂ gehalte (in het paleozische gesteente) afgenomen is door interactie met reactieve mineralen in de huidige aquifer.

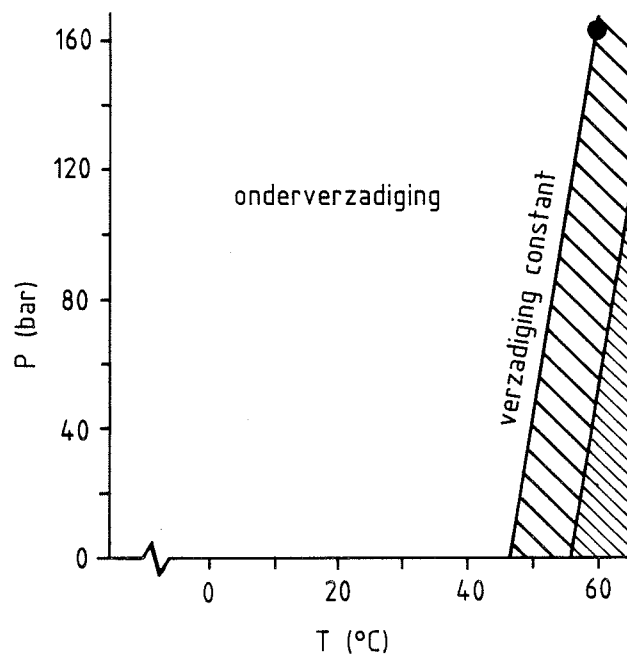
3.6.2 Zand van Berg

De complete chemische analyse van het water uit het Zand van Berg is gegeven in Annex 3.2. De waarden van een aantal chemische parameters wijzen erop dat er nog geen schoon formatiewater is geproduceerd:

- De pH heeft gedurende de produktietijd steeds gefluctueerd. De gemeten waarden zijn laag. Dit is toe te schrijven aan het "zuren" van het boorgat met zoutzuur (HCl);
- Mogelijk is het gemeten bicarbonaatgehalte aan de lage kant. Bij lage pH wordt bicarbonaat nl. omgezet in CO₂ dat vervolgens ontwijkt;
- Het ijzergehalte is zeer hoog. Dit is een gevolg van het gebruik van zuurstofhoudende boorspoeling, het inbrengen van belucht water uit het bassin en het zuren met belucht water. Er mag verwacht worden dat het ijzergehalte in het "schone" formatiewater veel lager zal zijn.

In de praktijk blijkt dat zolang de put niet schoon is, de gehalten aan zware metalen sterk kunnen afwijken van de gehalten in het "schone" water.

In tabel 3.3 wordt de chemische samenstelling van beide waters met elkaar vergeleken. Het water in het Zand van Berg heeft een hoger zoutgehalte dan water uit de Formatie van Houthem. Echter uit tabel 3.3



Figuur 3.5 Calcietverzadiging bij verschillende P,T-condities.
(water in de Formatie van Houthem)

blijkt tevens dat de chemische samenstellingen van beide waters goed met elkaar overeen stemmen.

- De ten opzichte van zeewater verhoogde bromidegehalten zijn kenmerkend voor water dat in contact is geweest met vast gesteente (Voigt, 1977);
- Het fluoridegehalte in het formatiewater van de Formatie van Houthem is hoog, maar aanmerkelijk lager dan in het Zand van Berg. Waarschijnlijk verliest het water in de Formatie van Houthem weer een deel van het fluoride;
- Het sulfaatgehalte van het water in het Zand van Berg ligt onder de detectiegrens; het water uit de Formatie van Houthem heeft een laag sulfaatgehalte. Waarschijnlijk bevat het Zand van Berg, in tegenstelling tot de Formatie van Houthem, voldoende organische stof om alle in het water aanwezige sulfaat te reduceren en in onoplosbare sulfiden om te zetten;
- Het verhoogde siliciumgehalte van beide waters bevestigt het thermale karakter van het water (Zuurdeeg en Van der Weiden, 1985).

Het verschil tussen het chloridegehalte van het geproduceerde water uit het Zand van Berg (31 500 ppm, tabel 3.3) en de chloridegehalten zoals bepaald aan poriënwaters uit kernen van het Zand van Berg (circa 21 000 ppm, tabel 3.1 - figuur 3.3), kan verklaard worden doordat de verzilting in de best doorlatende delen van het Zand van Berg, waaruit ook het formatiewater afkomstig is, het verst gevorderd is.

In het regionaal hydrogeologisch model (Zuurdeeg et al., 1987) wordt de herkomst van het water in de Centrale Slenk beschreven:

1. 'oppervlakkig' infiltratiewater in de ongeconsolideerde deklaag;
2. diepe kwel van water afkomstig uit de op grote diepten gelegen vaste gesteenten.

De te Asten geproduceerde formatiewaters uit de Formatie van Houthem en het Zand van Berg zijn samengesteld uit beide watertypes, met daarin een belangrijk aandeel van water uit het vast gesteente. De chemische samenstelling van beide formatiewaters wijst op contact met een evaporieethoudend carbonaatgesteente, dat vrijwel geen steenzout bevat. Op grond hiervan ligt het voor de hand dat een belangrijk deel van het water afkomstig is uit de Kolenkalk. Dit gesteente kan lokaal evaporieten bevatten en is een reservoirgesteente voor water.

	<u>Formatie van Houthem</u>	<u>Zand van Berg</u>
Druk:	165 bar	150 bar
pCO ₂ :	0,16 bar	0,056 bar
pH:	7,15	5,8
Dh:	+176 mV	-190 mV
Ec:	44 700 µS/cm	71 000 µS/cm
<u>Kationen</u>	<u>mg/l</u>	<u>mg/l</u>
Natrium	15 950	16 769
Lithium	2,70	3,10
Kalium	191	175
Magnesium	616	599
Calcium	1665	1400
Strontium	140	123
Barium	60	7,9
IJzer	7	149
Mangaan	0,15	2,72
Ammonium	76	135
Aluminium	10	3
<u>Anionen</u>		
Chloride	27 600	31 500
Sulfaat	8,40	< 0,23
Bicarbonaat	273	44
Fosfaat	29,40	43,40
Bromide	105	100
Jodide	13	17
Fluoride	1,80	7
<u>Ongeladen complexen</u>		
Kiezelzuur	113	151
Boorzuur	172	241
Kooldioxide	88	
Zwavelwaterstof	geen reuk	geen reuk
T.D.S. (mg/l)	47 100	51 475

Tabel 3.3 Chemische samenstelling formatiewater.

3.7 Chemisch evenwicht formatiewater

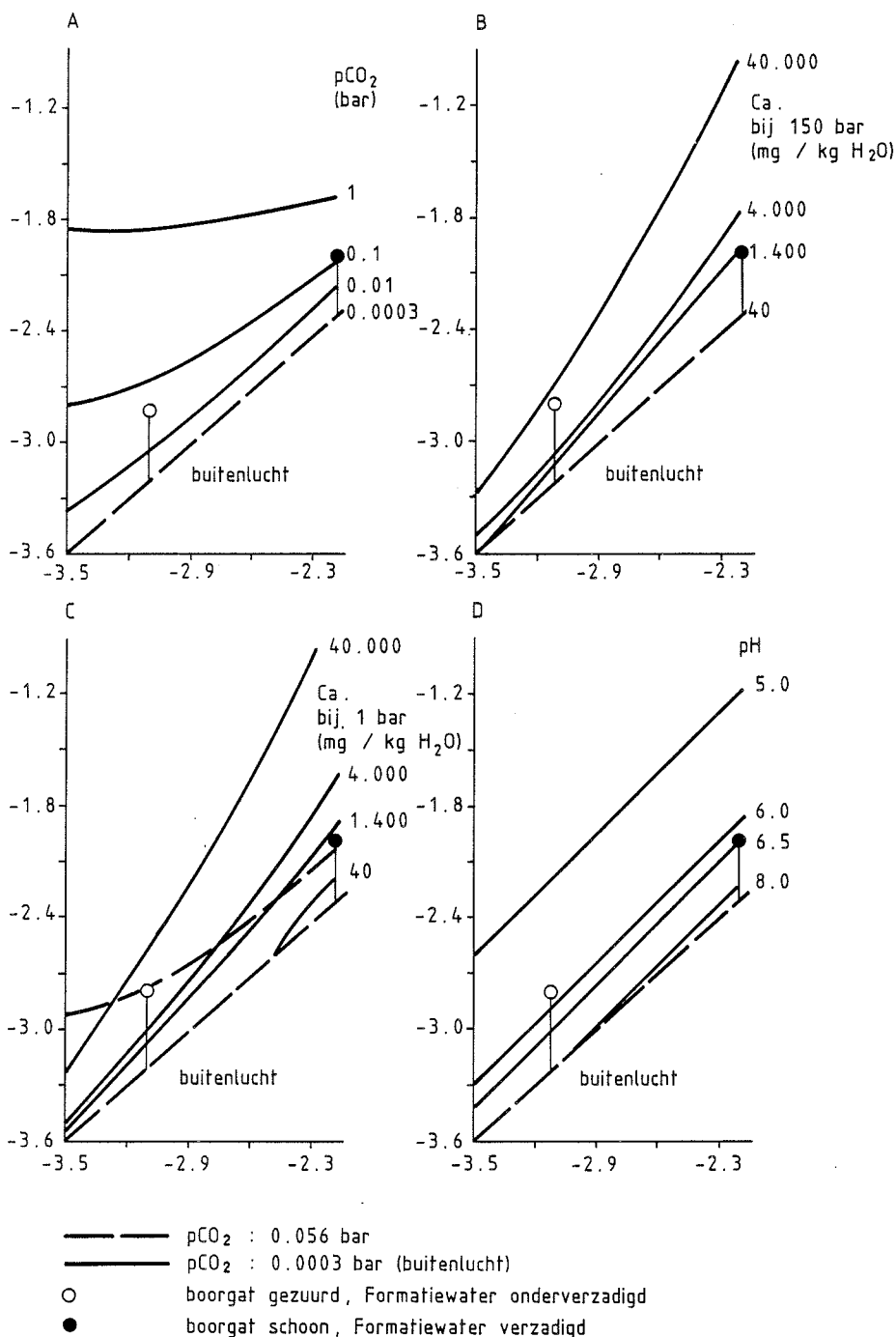
3.7.1 Formatie van Houthem

De berekende pH van het formatiewater uit de Formatie van Houthem bedraagt 6,25 bij een temperatuur van 60 °C. Het water heeft een relatief lage CO₂ druk. Bij een temperatuur van 60 °C en een druk van 160 bar is een CO₂ druk van 0,16 bar berekend. Dit betekent dat er geen ontgassing van het formatiewater zal optreden zolang de leidingen volledig gevuld zijn met water. Uit het water zal echter wel kooldioxide ontwijken indien de bovengrondse leidingen niet volledig gevuld zijn.

Door de calciumverzadigingswaarden te berekenen als functie van HCO₃ en Σ CO₂ zijn de maximale calciumgehalten in oplossing bepaald. Voor het formatiewater van Asten is berekend dat dit water ca. 1800 mg/l calcium in oplossing kan hebben. Dit betekent dat de verzadigingswaarde voor calcium (bij een temperatuur van 60 °C en een totaaldruk van 160 bar) in het formatiewater van Asten bereikt is. Overigens is dat niet zo bijzonder in stagnerend water in een kalkrijke aquifer.

De verlaging van de hydrostatische druk leidt tot een afname van de oplosbaarheid van calciet (CaCO₃). In de produktiefase zal dus CaCO₃ neerslaan uit water dat in de aquifer nog verzadigd was aan calciet. Er zijn twee mogelijkheden doorgerekend.

1. Het leidingsysteem is gesloten en de leidingen zijn volledig gevuld; de watertemperatuur bedraagt 60 °C. Voor deze specifieke omstandigheid geldt dat maximaal 165 mg/l CaCO₃ kan neerslaan bij een drukval tot 1 bar. Het is echter de vraag of uit water met deze mate van oververzadiging ook daadwerkelijk CaCO₃ zal gaan neerslaan. De oplossing blijft dan metastabiel.
2. Het leidingsysteem is gesloten maar de leidingen zijn niet volledig gevuld met vloeistof. Het systeem staat in open verbinding met de buitenlucht. De watertemperatuur bedraagt 60 °C. In dit systeem daalt de totaaldruk van 160 bar tot 1 bar en bovendien verliest het water in de bovengrondse leidingen CO₂ tot het water in evenwicht is met de buitenlucht. De pCO₂ daalt van 0,16 bar tot 0,0003 bar. Onder deze omstandigheden kan maximaal 670 mg/l CaCO₃ neerslaan. De beperkte concentratie van opgeloste carbonaat species zal dat overigens niet



Figuur 3.6 De $p\text{CO}_2$ in de aquifer (a), de calciumverzadiging in de aquifer (b), de calciumverzadiging bij een totaaldruk van 1 bar (c) en de pH (d) zijn uitgezet als functie van de alkaliteit (horizontaal) en het totaal aan CO_2 species (verticaal). (Water in het Zand van Berg).

De grondpatronen van de figuren zijn berekend voor $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

volledig toelaten omdat dan vrijwel alle carbonaatspecies gebruikt moeten worden om deze hoeveelheid neerslag te kunnen maken.

Om een aardwarmtesysteem volledig te kunnen benutten zal de afkoeling tijdens het opvoeren van het thermale water tot een minimum beperkt worden. Onder de huidige condities van de produktieput van Asten is het niet mogelijk om water van een temperatuur van 60 °C te produceren. De temperatuurafname tijdens het opvoeren van het water zal minimaal 10 °C bedragen. In die situatie neemt de oplosbaarheid van CaCO₃ af als gevolg van de afname van de totaaldruk, maar neemt toe als gevolg van de afname van de temperatuur. Er bestaat dus een 'ideale' afkoeling voor het geproduceerde thermale water tijdens het opvoeren. Deze 'ideale' afkoeling is gegeven in figuur 3.5. Gebeurt de afkoeling volgens deze lijn dan blijft het water verzadigd aan calciet en zal er op theoretische gronden geen neerslag van calciet optreden. Dat betekent voor Asten dat het water minstens 15 °C moet afkoelen tijdens het opvoeren om geen neerslag van CaCO₃ als gevolg van drukval.

De lijn die in figuur 3.5 de condities van calcietverzadiging verbindt is berekend voor een pH-waarde van 6,25. Een daling van de pH tijdens de produktie is niet nadelig, maar het wordt duidelijk anders indien de pH van het water tijdens de wateropvoer kan stijgen. Een geringe stijging al kan het voordelige temperatuureffect volledig teniet doen en zelfs bij een stijging van de pH tot 7 leiden tot een forse oververzadiging, zelfs als de temperatuur gelijk blijft.

3.7.2 Zand van Berg

De voor het water in het Zand van Berg berekende pCO₂ is betrekkelijk laag: pCO₂ = 10^{-1.25} (= 0,056) bar. De relatie tussen de alkaliteit, het totaal aan CO₂-species (Σ CO₂) en de voor het water berekende lijnen van gelijke pCO₂, is gegeven in figuur 3.6a. Bij een drukval daalt de totale gasdruk tot 1 bar en zal dus nooit lager worden dan de berekende pCO₂. Het water zal in een gesloten systeem dus niet gaan 'koken'. In contact met de buitenlucht zal wel CO₂ ontwijken.

De calciumverzadiging als functie van de alkaliteit en het totaal aan CO₂ species is weergegeven in figuur 3.6b. Voor de condities in de

aquifer bedraagt de calciumverzadiging ca. $10^{-2.5}$ mol (= 0,5623 mol/kg). Er is $10^{-1.43}$ mol (= 0,0368 mol) Ca gemeten: het water is dus zeer sterk onderverzadigd met calcium.

De verlaging van de hydrostatische druk leidt tot een afname van de oplosbaarheid van calciet. Het is dus mogelijk dat in dit produktiefase CaCO_3 neerslaat uit het water dat in de aquifer nog onderverzadigd was aan calciet.

Er zijn twee mogelijkheden doorgerekend:

1. Het leidingsysteem is gesloten en de leidingen zijn volledig gevuld met water. De watertemperatuur bedraagt 60 °C. Bij produktie van water in een gesloten systeem daalt de totaaldruk (p_{TOT}) van 150 bar tot 1 bar. Aangezien de p_{CO_2} in het systeem kleiner is dan p_{TOT} (= 1 bar), kan er geen CO_2 ontwijken en zal dientengevolge ook geen effect op de pH waarneembaar zijn. De p_{CO_2} blijft dus $10^{-1.25}$ bar (= 0,056 bar). Uit figuur 3.6c blijkt dat onder deze omstandigheden een geringe daling van de calciumverzadiging optreedt tot ca. $10^{-0.35}$ (= 0,45 mol). Het water is dus nog steeds sterk onderverzadigd aan calcium.
2. Het leidingsysteem staat in open verbinding met de buitenlucht. De watertemperatuur bedraagt 60 °C. Ook hier treedt een drukval op tot 1 bar. Door de open verbinding met de buitenlucht zal het formatiewater in de bovengrondse leidingen CO_2 verliezen totdat er een evenwicht is bereikt met de p_{CO_2} van de atmosfeer: de p_{CO_2} daalt van 0,056 bar tot 0,0003 bar (figuur 3.6a). Uit figuur 3.6c en d blijkt de afname van de p_{CO_2} tot gevolg te hebben dat:
 - a. de calciumverzadiging daalt tot 10^{-2} mol/kg (figuur 3.6c);
 - b. de pH stijgt naar 7.9 (figuur 3.6d).

Deze calciumverzadiging is slechts weinig lager dan de gemeten calciumconcentratie van $3.5 \cdot 10^{-2}$. Er is dus sprake van een geringe oververzadiging. Deze is echter zo gering dat er naar alle waarschijnlijkheid geen kalkneerslag gevormd zal worden. In de praktijk blijkt namelijk dat er pas bij forse oververzadiging ook daadwerkelijk kalkvorming plaatsvindt.

Een temperatuurverlaging tijdens de produktie van formatiewater heeft tot gevolg dat er meer calcium in oplossing kan blijven (de

calciumverzadiging neemt toe). Door tijdens de produktie de temperatuur van het formatiewater te laten dalen is het dus mogelijk de vorming van een calcieneerslag, die mogelijk kan plaatsvinden ten gevolge van drukafname, te voorkomen.

Bij produktie van het water uit het Zand van Berg zal in het ongunstigste geval (leidingsysteem in open verbinding met de buitenlucht) ten gevolge van drukafname een geringe oververzadiging aan calcium optreden. Een gelijktijdige geringe daling van de temperatuur zal echter tot gevolg hebben dat het formatiewater onderverzadigd blijft aan calcium.

3.8 Geschiktheid van het formatiewater voor balneologische doeleinden

De ontwikkeling van de ideeën en normen voor geneeskrachtige waters in Duitsland wordt geïllustreerd in onderstaand overzicht:

- 1892 Stichting van het 'Allgemeine Deutsche Bäderverband'
- 1904 'Ständige Ausschuss für die gesundheitlichen Einrichtungen in die Kur- und Badeorten
- 1911 'Nauheimer Beschlüsse': Zusammenfassung wissenschaftlicher Grundlagen für die Heilquellen
- 1932 'Salzuflener Beschlüsse'
- 1937 Richtlinien über die Preisgestaltung der Kurverwaltungen, einschliesslich der Begriffsbestimmungen über Heilquellen, Bäder und Kurorte
- 1951 Richtlinien und Begriffsbestimmungen für die Anerkennung von Bade- und Heilklimatischen Kurorten, Luftkurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen
- 1972 Nieuwe bewerking van de normen
- 1979 Meest recente bewerking van de normen.

Waren tot voor kort nog mineraalwater en geneeskrachtig water praktisch synoniem, in de 'Begriffsbestimmungen' van 1979 wordt niet gesproken over het begrip mineraalwater. De Duitse normen die in dit onderzoek getoetst worden, zijn de uit 1979 daterende normen voor geneeskrachtig water. De belangrijkste zijn:

1. het minimumgehalte van 1000 mg/kg opgeloste vaste stof
2. 20 mg/kg ijzer
3. 1 mg/kg jodide
4. 1 mg/kg zwavel (S en H₂S)
5. 18 nCi/kg radon
6. 1000 mg/kg kooldioxide
7. 1 mg/kg fluoride
8. Thermaal water heeft tenminste een temperatuur van 20 °C
9. Een Sole bevat tenminste 5,5 g/kg natrium en 8,5 g/kg chloride.

N.B.1 In dit onderzoek worden de concentraties niet uitgedrukt in mg opgeloste stof per kilogram water, maar in mg opgeloste stof per liter water. In de oneindig verdunde oplossing zijn beide waarden aan elkaar gelijk. In het concentratiebereik waarover hier gesproken wordt, heeft 1 kg water een volume dat een fractie kleiner is dan 1 liter. Uitgedrukt in mg/l zouden de normen dus een fractie hoger zijn.

N.B.2 Is de Sole-norm van 8500 mg/l chloride overschreden dan is het praktisch altijd zo dat ook die van 5,5 g/l natrium overschreden is.

N.B.3 De normen 1 t/m 8 gelden voor de plaats waar het water toegepast wordt.

Op grond van de nu bekende samenstelling van het water in het Zand van Berg kan, met enig voorbehoud omdat de watersamenstelling nog kan veranderen, het water getoetst worden aan de Duitse normen:

1. opgeloste stof: overschreden
2. ijzer: mogelijk overschreden
3. jodide: overschreden
4. zwavel: onbekend
5. radon: onbekend
6. kooldioxide: lager
7. fluoride: overschreden
8. thermaal water: overschreden
9. Sole: overschreden

Het water van Asten is volgens de Duitse normen een (mogelijk ijzerhoudende) jodide- en fluoridehoudende thermale Sole. In de balneotherapie wordt dit water geclassificeerd als een 5% Sole (ca. 50 g/l opgeloste stof) en wordt middelsterk genoemd.

Het verdient aanbeveling om op grond van de nu bekende watersamenstelling een voorlopig balneologisch rapport te laten maken.

4. FORMATIE EVALUATIE

4.1 Inleiding

Om een uitspraak te kunnen doen over het geothermisch potentieel van een formatie moet er informatie beschikbaar zijn over de samenstelling en de dimensies van een formatie, over het poriënvolume en de poriënhoud, over de doorlatendheid van het gesteente en over de temperatuur. Hiertoe zijn metingen uitgevoerd in het boorgat en aan gekernd materiaal afkomstig uit het boorgat. Tevens is gebruik gemaakt van geologische informatie ontleend aan het boorgruis dat tijdens het boren van de put (hoofdstuk 2) werd bemonsterd.

Het proces waarbij boorgat- en kernmetingen worden geïnterpreteerd en geëvalueerd om de eerder genoemde karakteristieken van een formatie te bepalen heet Formatie Evaluatie (Helander, 1983). In dit hoofdstuk zal beschreven worden welke metingen in de put Asten-2 zijn uitgevoerd, welke interpretatiemethoden zijn toegepast en wat de resultaten hiervan zijn.

4.2 Metingen

4.2.1 Inleiding

De metingen die in de onderzoeksboring Asten-2 zijn uitgevoerd kunnen worden onderscheiden in

- boorgatmetingen;
- metingen aan monsters uit boorkernen;
- metingen aan boorgruis;
- "repeat formation tests" (RFT)*;
- putproeven.

4.2.2 Boorgatmetingen

Boorgatmetingen worden gemaakt door een sonde aan een dunne draad (wireline) in het boorgat te laten. Afhankelijk van het type sonde wordt een natuurlijke eigenschap van het gesteente gemeten (bijv. de natuurlijke gammastraling) of wordt de verandering van een signaal

* zie Verklarende woordenlijst - Annex 4.1

(geluid, stroom) bepaald over het traject, dat het signaal in het gesteente aflegt. Uit de gemeten signalen kunnen geologische of petrofysische eigenschappen van het gesteente worden afgeleid.

In de boringen Asten-2 zijn diverse soorten logs opgenomen. Met behulp van de "gamma ray" log* (GR), die de natuurlijke gammastraling meet en de "spontaneous potential" log* (SP), die de natuurlijke potentiaal van de formatie meet, kan de lithologische indeling (zand, klei, kalk, etc.) langs het boorgat nauwkeurig worden bepaald. De verschillende formaties en de samenstelling hiervan, kunnen hierdoor worden onderscheiden.

Bij de zogenaamde elektrische logs wordt de formatierespons gemeten op geïnduceerde elektrische stromen of magnetische golven. De logs die zijn opgenomen, zijn de "deep induction" log*, de "medium induction" log* en de "short guard resistivity" log*. Met behulp van deze logs wordt de weerstand bepaald van de formatie, van de spoelingskoek op de boorgatwand en van het gedeelte van de formatie waar spoeling is binnengedrongen.

Als porositeitslogs zijn de "density" log* en de "neutron" log* gebruikt, waarmee uit de formatierespons op respectievelijk gammastraling en beschieting met neutronen de porositeit van het gesteente wordt berekend. De porositeit kan daarnaast nog op een indirecte manier worden bepaald m.b.v. gegevens uit de "spontaneous potential" log en de elektrische weerstands logs. Een caliperlog* werd opgenomen om de exacte boorgatdiameter te bepalen. Dit is ondermeer nodig bij het cementeren van de verbuizing van de put. De Formatie van Houthem is afwijkend van de andere onderzochte formaties door het feit dat hier sprake is van een gespleten kalksteen in plaats van een zandsteen. In een kalksteen vormen de spleten de stroomkanalen in een slecht doorlatende matrix.

Om de intervallen te vinden waar deze spleten voorkomen is een zgn. "frac finder" log* opgenomen, die bestaat uit een combinatie van een "delta-t sonic" log*, een "shear wave amplitude" log*, een "compression wave amplitude" log* en een "micro seismogram" log*. Dit zijn allen logs die de formatierespons op trillingen registreren.

Twee maanden na het voltooiën van de boring is een temperatuurmeting gedaan. Om formatietemperaturen te kunnen meten, die niet beïnvloed zijn door boorwerkzaamheden, is een dergelijke wachttijd noodzakelijk.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de boorgatmetingen en de trajecten waarover deze zijn opgenomen.

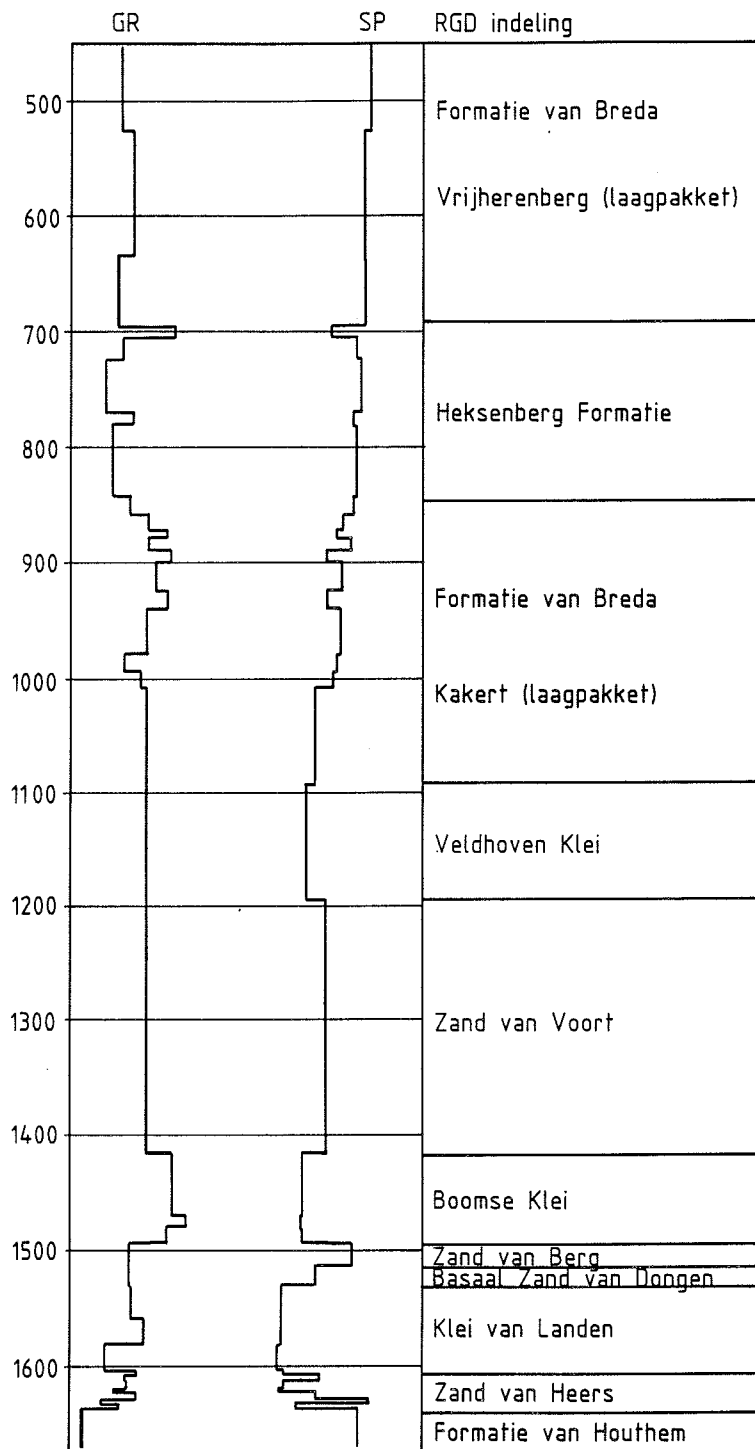
• Gamma ray log	20	- 1675	(m)
• Spontaneous potential log	20	- 1675	(m)
• Normal resistivity LN 160 cm	20	- 450	(m)
• Normal resistivity SN 40 cm	20	- 450	(m)
• Deep induction log	450	- 1675	(m)
• Medium induction log	450	- 1675	(m)
• Short guard resistivity log	450	- 1675	(m)
• Capiler log	20	- 1675	(m)
• Density log	553	- 999	(m)
	en 1330	- 1639	(m)
• Neutron log	553	- 999	(m)
	en 1330	- 1639	(m)
• Delta-t sonic log	1631	- 1669	(m)
• Shear wave amplitude log	1631	- 1669	(m)
• Compression wave amplitude log	1631	- 1669	(m)
• Micro seismogram log	1631	- 1669	(m)
• Temperatuur	0	- 1640	(m)

Tabel 4.1 Boorgatmetingen in de boring Asten-2.

4.2.3 Metingen aan monsters uit boorkernen

Over diverse intervallen zijn in de boring Asten-2 kernen genomen. Deze gesteentemonsters, met een diameter gelijk aan die van de binnenzijde van de boorbuis, zijn genomen tussen 904 en 906 m beneden maaiveld (Formatie van Breda), tussen 1229 en 1248 m (Zand van Voort) en tussen 1502 en 1535 m (Zand van Berg, Zand van Dongen en Landen Klei).

Uit deze kernen is om de 30 cm een plug getrokken waaraan zeer nauwkeurig de formatiesamenstelling, de porositeit en de permeabiliteit zijn bepaald. Om de permeabiliteit, die d.m.v. stikstofinjectie (N₂) wordt bepaald te kunnen corrigeren voor formatiewater, zijn tevens injectieproeven gedaan met synthetisch formatiewater. De aan de kernen gemeten waarden kunnen met de gegevens uit de boorgatmetingen worden gecorreleerd om een continue permeabiliteitsverdeling langs de boorgatwand samen te stellen.



Figuur 4.1 Indeling in deelintervallen op basis van gamma ray (GR)-, spontaneous potential (SP)-log en de stratigrafische indeling door RGD.

Na afloop van de porositeit- en permeabiliteitsmetingen aan de kernpluggen zijn deze pluggen gebruikt voor korrelgrootte analyses. De analyse van de korrelgrootte verdeling voor de verschillende onderzochte formaties zijn gebruikt om directe- en indirecte methoden voor de bepaling van de permeabiliteit te kunnen vergelijken en te valideren (Hoofdstuk 5).

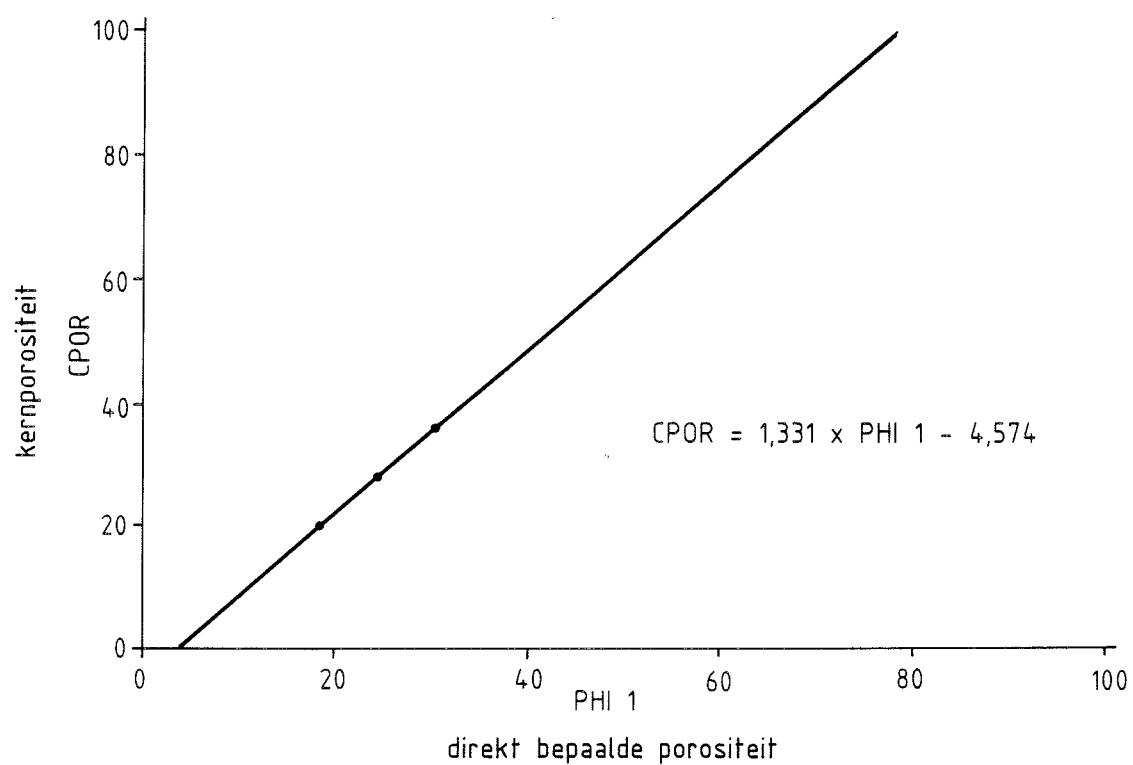
4.2.4 Metingen aan boorgruis

Gedurende het boren van de put wordt het boorgruis, dat met de boorspoeling naar boven wordt gevoerd, op de schudzeef uit de spoeling gefilterd. Dit gruis dat op de schudzeef wordt verzameld geeft de eerste informatie m.b.t. de stratigrafie en de lithologie van het doorboorde gesteente (hoofdstuk 2).

Grotere stukken boorgruis kunnen tevens worden gebruikt om het chloridegehalte van de vloeistofinhoud aan te bepalen (hoofdstuk 3). Hiermee kan een goede indicatie van het zoutgehalte van de verschillende formatiewaters worden verkregen. Dit is o.m. van belang om de viscositeit van het formatiewater te kunnen schatten.

4.2.5 Repeat formation tests

Met behulp van een "Repeat Formation Tester" of RFT kan snel een indruk worden verkregen van de formatiedruk op verschillende diepten en, maar met beperkte nauwkeurigheid, van de permeabiliteit. Een RFT wordt aan een dunne draad in het boorgat gelaten en drukt op de verkozen diepte d.m.v. een veer tegen de boorgatwand. Hier wordt een plug de formatie ingedrukt, waardoor formatievloeistof een kamertje binnenloopt. Het drukverloop tijdens het instromen en het weer afsluiten van de plug wordt gemeten. Hieruit kan de formatiedruk en de permeabiliteit worden bepaald. De permeabiliteiten kunnen echter alleen bij laagpermeabele formaties worden bepaald. Het voordeel van een RFT is dat gedurende één keer inlaten meerdere formaties kunnen worden getest. In de put Asten-2 is achtereenvolgend op een diepte van 866, 887, 918, 939, 971, 1242, 1390, 1507, 1522 en 1608 m beneden maaiveld een RFT meting uitgevoerd.



Figuur 4.2 Correlatie tussen de kernporositeit CPOR en de direct bepaalde porositeit PHI1.

4.2.6 Putproeven

Een betere maar ook kostbare methode om de gemiddelde permeabiliteit van een formatie te bepalen is een putproef. Hierbij wordt het drukverloop gemeten gedurende een langdurige periode van produceren van een formatie en een periode van insluiten. De gemiddelde permeabiliteit van de zone die heeft bijgedragen aan de produktie kan hieruit worden bepaald. Tevens wordt hiermee de produktiviteit van de betreffende formatie vastgesteld. In de boring Asten-2 is, nadat alle bovenliggende formaties door stalen verbuizingen waren afgesloten, in eerste instantie een putproef uitgevoerd op de diepst liggende formatie; de Formatie van Houthem. Een complicerende factor hierbij was dat de Formatie van Houthem geen min of meer homogeen zandsteen reservoir is waarop de gebruikelijke putproef theorie van toepassing is. Een gespleten kalksteen reageert in feite als twee systemen, de spleten en de matrix, waartussen een uitwisseling bestaat. Hiervoor kan het zogenaamde "dual porosity" model* worden toegepast (Gringarten, 1984). Door de lage permeabiliteit heeft de matrix een langere responsietijd zodat de test ook langer moet duren.

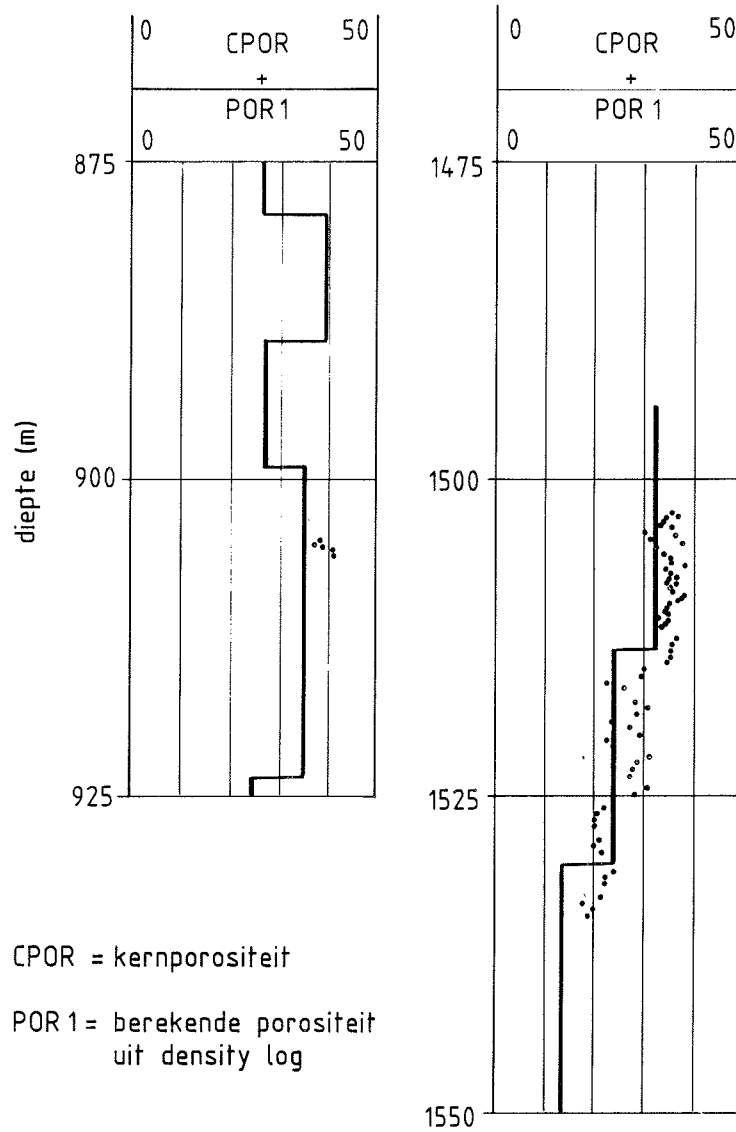
Om de gunstige resultaten van de voorlopige reservoir evaluatie met betrekking tot het Zand van Berg te verifiëren is in tweede instantie ook op het Zand van Berg een produktietest uitgevoerd. De boring is daartoe op de desbetreffende diepte geopend en met een z.g. prepacked filter afgewerkt. De produktietest is uitgevoerd met behulp van stikstof (N₂) lift.

4.3 Interpretatie van de metingen

4.3.1 Inleiding

Het belangrijkste doel van de interpretatie van de metingen is het bepalen van de porositeit, de permeabiliteit en de temperatuur als functie van de diepte.

De porositeit kan worden beschouwd als een primaire reservoirparameter. De porositeit kan, in afnemende nauwkeurigheid, worden bepaald uit kernmetingen, directe porositeitslog en op indirecte wijze uit andere logs. Niet alle metingen zijn over het gehele diepte interval beschikbaar. Om minder nauwkeurig bepaalde porositeitswaarden te corrigeren zijn de metingen onderling gecorreleerd.



Figuur 4.3 Overeenkomst tussen berekende porositeit uit de density log en de kernporositeit.

Met behulp van de kernmetingen, en de resultaten van de RFT's en de putproef is het verband tussen de permeabiliteit en de porositeit vastgesteld.

In figuur 4.1 is, op basis van de "gamma ray" log, de "spontaneous potential" log en de uit het boorgruis afgeleide stratigrafische beschrijving, het geboorde traject ingedeeld in deelintervallen. De deelintervallen zijn zo gekozen, dat de logeigenschappen over die intervallen binnen redelijke grenzen constant zijn. Over het algemeen komen begrenzingsen in de stratigrafische beschrijving gemeten aan het boorgruis overeen met begrenzingsen in de indeling op basis van de logs. Op plaatsen waar zich een duidelijk verschil tussen de beide methoden voordoet (enkele meters), is bij de verdere evaluatie de logindeling gehanteerd.

4.3.2 Porositeit

4.3.2.1 Directe methode om de porositeit te bepalen

Voor de formatie-evaluatie is voornamelijk gebruik gemaakt van de "density" log. De voor de berekening benodigde waarden van de matrix dichtheid zijn afkomstig uit de kernmetingen (tabel 4.2). De dichtheid van de formatievloeistof is bepaald m.b.v. de berekende chloride-gehalten (hoofdstuk 3) en de temperatuur. Voor de waarden van de bulkdichtheid is het gemiddelde over de deelintervallen uit de "density" log genomen.

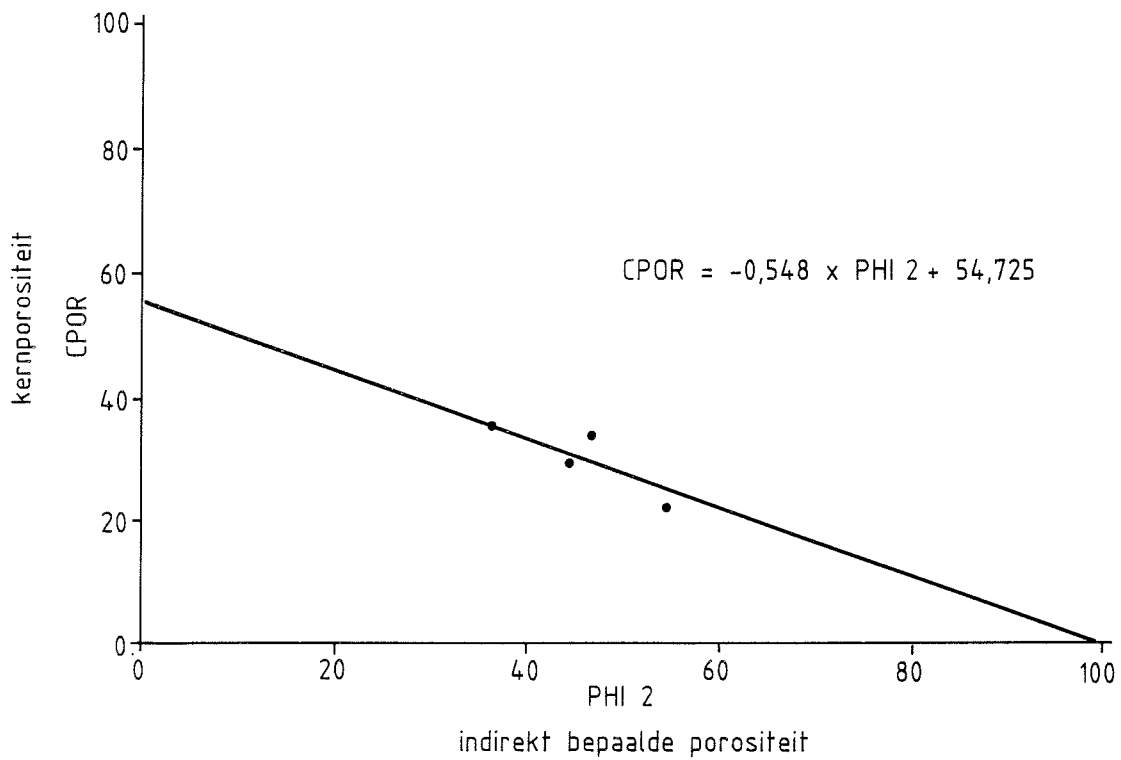
527,1 - 1093,0	Formatie van Breda	ρ_m	=	2,71	[g/cm ³]
1196,1 - 1415,7	Zand van Voort	ρ_m	=	2,60	[g/cm ³]
1494,1 - 1513,5	Zand van Berg	ρ_m	=	2,65	[g/cm ³]
1514,1 - 1530,5	Basaal Zand van Dongen	ρ_m	=	2,66	[g/cm ³]
1530,6 - 1670,0	Klei van Landen	ρ_m	=	2,63	[g/cm ³]

Tabel 4.2 Matrixdichtheid (ρ_m).

De porositeit kan uit het volgende verband worden berekend:

$$\phi_{dir} = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f} \quad , \quad (4.1)$$

waarin:



Figuur 4.4 Correlatie tussen de indirect bepaalde porositeit PHI2 en de kernporositeit CPOR.

ϕ_{dir} = direct bepaalde porositeit
 ρ_m = matrix dichtheid
 ρ_b = bulk dichtheid
 ρ_f = vloeistof dichtheid

De aldus berekende waarden voor de porositeit doen niet noodzakelijkerwijs een reële uitspraak over de werkelijke porositeit, omdat bepaalde effecten - zoals bijvoorbeeld het kleigehalte van de formatie - niet in de berekening betrokken zijn. Ter bepaling van de werkelijke porositeit zijn voor drie intervallen kernmetingen aanwezig.

De berekende porositeit wordt in de gekerde intervallen gecorreleerd met de kernporositeit. Hieruit volgt een lineaire relatie die gebruikt wordt om op basis van de "density" log over het gehele traject een reëlere uitspraak te doen over de porositeit.

Uit figuur 4.2 volgt dat de beste relatie tussen de kernporositeit CPOR en de directe porositeit PHI1 verkregen wordt door:

$$CPOR = 1,331 \times PHI1 - 4,574 \quad . \quad (4.2)$$

De berekende porositeit wordt hiermee gecorrigeerd. Figuur 4.3 geeft de overeenkomst aan tussen de berekende porositeit en de kernporositeit.

4.3.2.2 Indirecte methode om de porositeit te bepalen

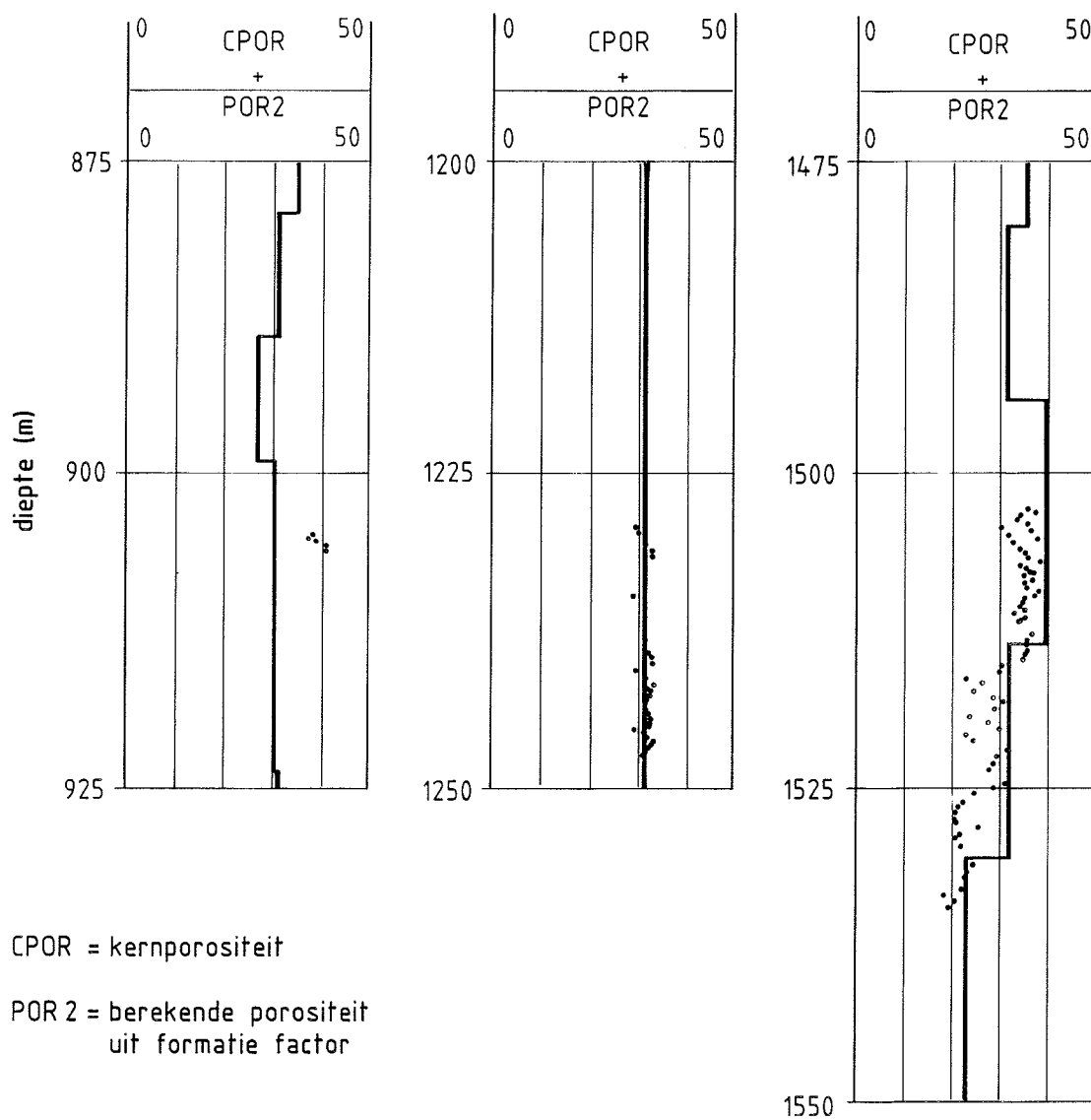
De porositeit kan ook berekend worden m.b.v. de formule van Archie (Helander, 1983), die luidt:

$$\phi_{indir} = 100 \cdot F^{-1/m} \quad , \quad (4.3)$$

waarin:

ϕ_{indir} = indirect bepaalde porositeit
F = formatiefactor; R_t/R_w
m = cementatie exponent
 R_t = soortelijke elektrische weerstand van de formatie
 R_w = soortelijke elektrische weerstand van formatie water

De formatieweerstand R_t kan worden bepaald met behulp van de "deep induction" log, de "medium induction" log en de "short guard resistivity" log. De weerstand van het formatiewater R_w wordt berekend



Figuur 4.5 Overeenkomst tussen berekende porositeit uit de formatiefactor en de kernporositeit.

uit de "Spontaneous Potential" log. De gebruikte methodiek is beschreven in appendix 4.2.

De cementatie exponent is een functie van de mate van consolidatie van het gesteente. De waarde hiervoor moet worden geschat. Aangezien de doorboorde formaties allen sterk ongeconsolideerd zijn is hier een waarde 1,2 aangenomen voor de cementatie-exponent.

Om een lineaire relatie te vinden, wordt de aldus berekende porositeit in de gekernde intervallen weer gecorreleerd met de kernporositeit. Hiermee wordt een uitspraak gedaan over de porositeit op basis van de formatie factor. Uit figuur 4.4 volgt dat het beste passende verband tussen de kernporositeit CPOR en de indirecte porositeit PHI2 gegeven wordt door:

$$CPOR = -0,548 \times PHI2 + 54,725 \quad . \quad (4.4)$$

De berekende porositeit wordt hiermee gecorrigeerd. Figuur 4.5 geeft de overeenkomst aan tussen de berekende porositeit en de kernporositeit.

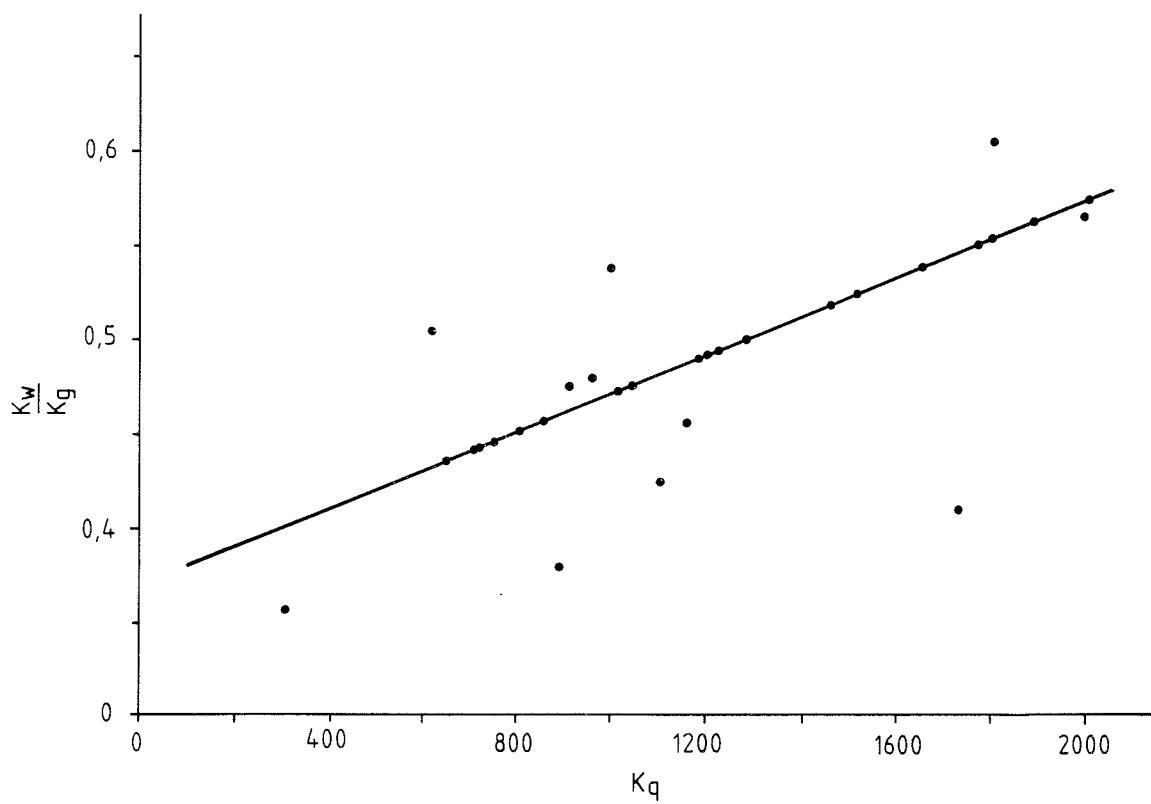
De porositeitswaarde afgeleid uit de "density" log heeft over het algemeen een grotere nauwkeurigheid dan de indirect bepaalde waarde. Dit is het gevolg van de schatting van de cementatie exponent en het grotere aantal stappen dat nodig is voor de indirecte bepaling, waarbij onnauwkeurigheden zich opstapelen.

4.3.3 Permeabiliteit

4.3.3.1 Permeabiliteitsmetingen

In de boring Asten-2 zijn 3 soorten metingen gedaan waaruit permeabiliteiten kunnen worden bepaald. Dit zijn kernmetingen, RFT's en twee putproeven. De hiermee bepaalde permeabiliteiten kunnen niet zonder meer worden vergeleken. Er dient onderscheid gemaakt te worden tussen de lokaal gemeten permeabiliteit en de gemiddelde formatie-permeabiliteit en tussen de gas- of stikstof (N₂)-permeabiliteit en de vloeistof- of brinepermeabiliteit.

Metingen aan kernpluggen geven een lokale permeabiliteit die alleen geldig is voor de desbetreffende plug met een diameter van één inch. Met behulp van de kennis uit boorgatmetingen over de lithologische verdeling binnen de formatie, is extrapolatie naar een gemiddelde formatie permeabiliteit mogelijk indien voldoende kernmetingen aanwezig zijn.



K_w = waterpermeabiliteit
 K_g = gaspermeabiliteit

Figuur 4.6 Verhouding van de water-/gas permeabiliteit als functie van de gaspermeabiliteit in het Zand van Berg.

Permeabiliteiten uit RFT's zijn geldig voor het gebied dat een bijdrage levert aan de stroming. Gezien het geringe verplaatste volume (30 cc) is ook deze meting slechts lokaal geldig.

Bij putproeven levert een veel groter deel van het reservoir een bijdrage aan de stroming. Door het kiezen van de produktiesnelheid en de tijdsduur van de test kan de omvang of straal van dit gebied worden bepaald.

Uit een putproef kan een gemiddelde waarde voor de permeabiliteit van de formatie rondom de put worden berekend. Informatie met betrekking tot de permeabiliteitsverdeling binnen de formatie kan hieruit over het algemeen niet zonder meer worden bepaald.

De permeabiliteitswaarden die in het laboratorium worden bepaald, worden gemeten met behulp van stikstof (N₂). De stroming van gas door een poreus medium kan verschillen van die van een vloeistof doordat bijvoorbeeld het gas langs de wanden van de gesteentekorrels kan "slippen", waardoor de stromingsweerstand afneemt ten opzichte van die voor vloeistof. Derhalve dienen de gemeten permeabiliteitswaarden gecorrigeerd te worden. Hiertoe is aan een aantal representatieve kernmonsters de vloeistof permeabiliteit gemeten. De correctiefactor als functie van de absolute permeabiliteit die hiermee is bepaald is weergegeven in figuur 4.6. Hieruit blijkt dat de permeabiliteit ongeveer halveert bij stroming van water.

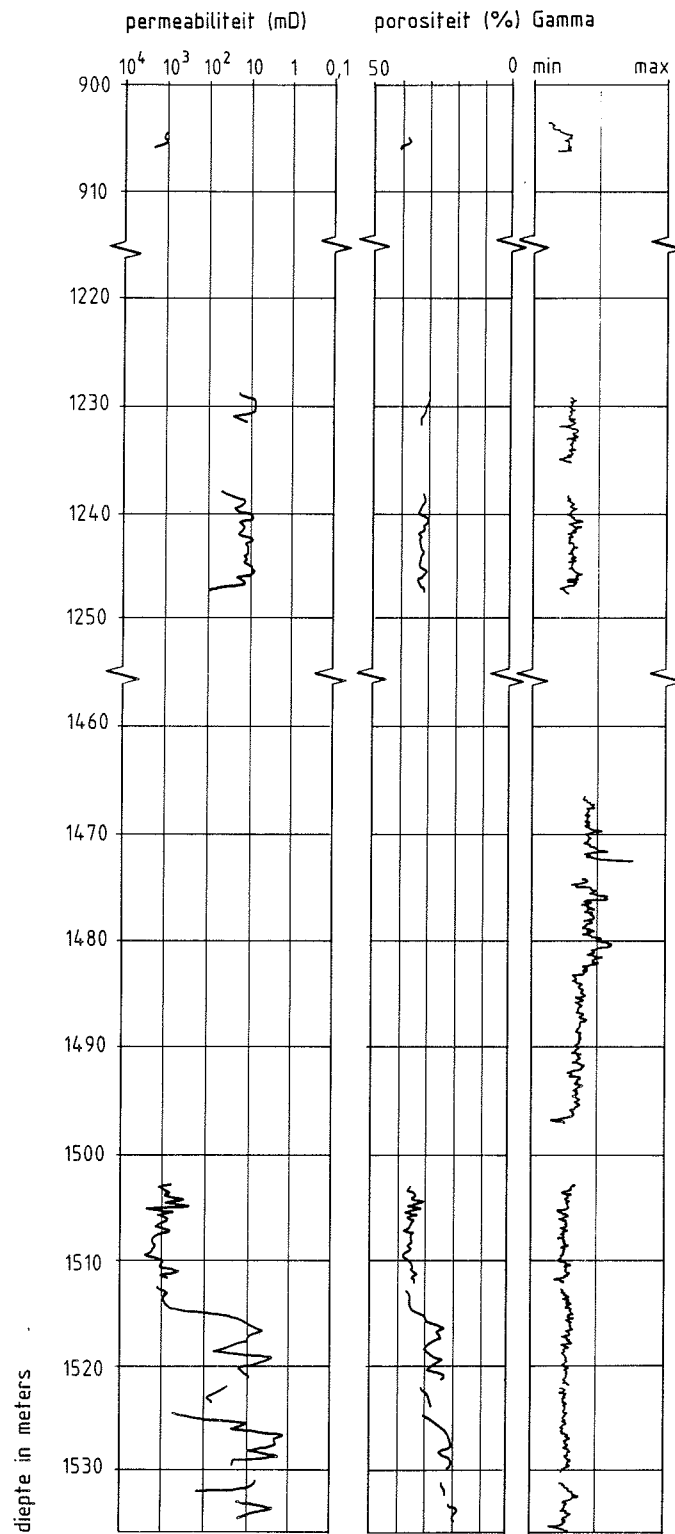
4.3.3.2 Bepaling van de permeabiliteit

- Kernmetingen

Niet over het gehele traject van de boring zijn kernmetingen gedaan. De aan kernen gemeten permeabiliteitswaarden zijn weergegeven in figuur 4.7. Om ook in de niet gemeten trajecten een uitspraak te kunnen doen is in figuur 4.8 de correlatie bepaald tussen de kernporositeit en de kernpermeabiliteit (N₂). Hieruit volgt het volgende verband:

$$\log CPER = 0,135 \times CPOR - 2,404 \quad . \quad (4.5)$$

Dit verband kan worden gebruikt om met de uit boorgatmetingen berekende porositeitswaarden (correlatieverband 4.2), de permeabiliteit te berekenen.



Figuur 4.7 De gemeten kernporositeit en kernpermeabiliteit.

- RFT metingen

Uit de interpretatie van de RFT metingen is gebleken dat de gemeten permeabiliteitswaarden niet betrouwbaar zijn. De reden hiervoor is gelegen in het feit dat bijna alle gemeten formaties een te hoge gemiddelde permeabiliteit hebben om een RFT te kunnen toepassen. Indien een formatie een hoge permeabiliteit heeft, zal de optredende drukval tijdens een RFT meting gering zijn. Als de optredende drukverschillen kleiner zijn dan het meetbereik van het meetapparaat zijn de metingen niet meer bruikbaar.

- Putproeven

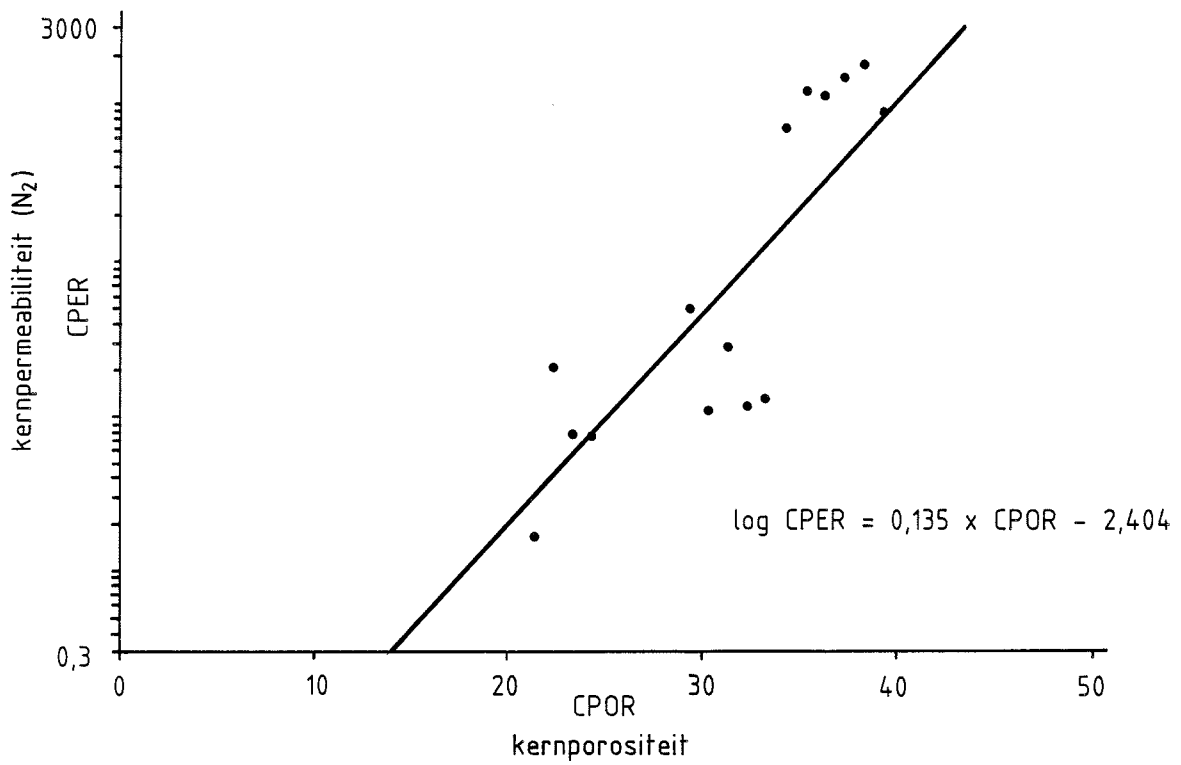
Voor beide putproeven zijn de effecten van de verschillende geologische en geometrische randvoorwaarden op het mogelijke drukverloop gesimuleerd en afgeschat. Op basis van dit vooronderzoek voor beide formaties is voor elk van de putproeven een optimaal ontwerp gemaakt (Haak, 1987 en 1988).

Formatie van Houthem

De eerste putproef is uitgevoerd in de formatie van Houthem, een gespleten kalksteen. Zoals eerder vermeld kan een dergelijk gesteente worden opgevat als een "dubbel-systeem". Over het algemeen bestaat het kalksteen uit een spleetsysteem dat slechts een gering percentage van het porievolume inneemt, maar waardoor vloeistof zeer makkelijk stroomt en uit een gesteentematrix die wel porositeit heeft maar waarin de porieën onderling slecht communiceren zodat de permeabiliteit laag is.

Bij een drukverlaging ten gevolge van produktie reageert het spleetsysteem en het matrixsysteem op een verschillende wijze. Bij de interpretatie van een dergelijke proef wordt gebruik gemaakt van het principe van "type curve matching". Grafieken met de drukrespons van formaties met constante eigenschappen (type curves) worden over de gemeten drukrespons van het te interpreteren reservoir gelegd, totdat een overeenkomstig drukverloop wordt waargenomen. Hieruit worden de reservoir eigenschappen afgeleid.

Bij de boring Asten-2 werd de duur van de putproef gedeeltelijk bepaald door de grootte van het bassin waarin het geproduceerde water moest worden opgevangen. Echter tijdens de uitvoering van de proef bleek de produktiviteit sterk terug te lopen, waarna besloten werd de proef vroegtijdig te beëindigen.



Figuur 4.8 Correlatie tussen de kernporositeit CPOR en de kernpermeabiliteit (N₂) CPER.

De tijdsduur van de proef bleek voldoende om de drukrespons van de spleten te meten, maar niet voldoende om ook de matrix te kunnen evalueren. Bij de interpretatie is toen besloten om op basis van de beschikbare informatie het verdere drukverloop te voorspellen en de resultaten te onderwerpen aan een gevoeligheidsanalyse. Alle berekende grootheden hebben een betrouwbaarheidsinterval meegekregen. Voor sommige grootheden is het interval dermate breed dat slechts een indicatie van de maximaal haalbare waarde kan worden verkregen.

De permeabiliteit van de spleten (24 tot 35 mD) bleek aanzienlijk lager dan werd verwacht op basis van testresultaten in België. Aangezien kon worden vastgesteld dat de spleetzone (verkarsting) in de kalksteen in Asten-2 wel degelijk aanwezig is, is dit wellicht een bevestiging van de hypothese dat de spleten nog gedurende de verkarsting zijn gevuld met fijn zand. De gemeten permeabiliteit zou dan die van het zand zijn.

Zand van Berg

Een tweede putproef is uitgevoerd in het Zand van Berg. Het Zand van Berg is een zeer fijnzandig en slibhoudend sediment. De boven begrenzing wordt gevormd door kleiige afzettingen van de Formatie van Rupel. Aan de onderzijde wordt het Zand van Berg door een 0,5 m dikke kleilaag gescheiden van het Basaal Zand van Dongen.

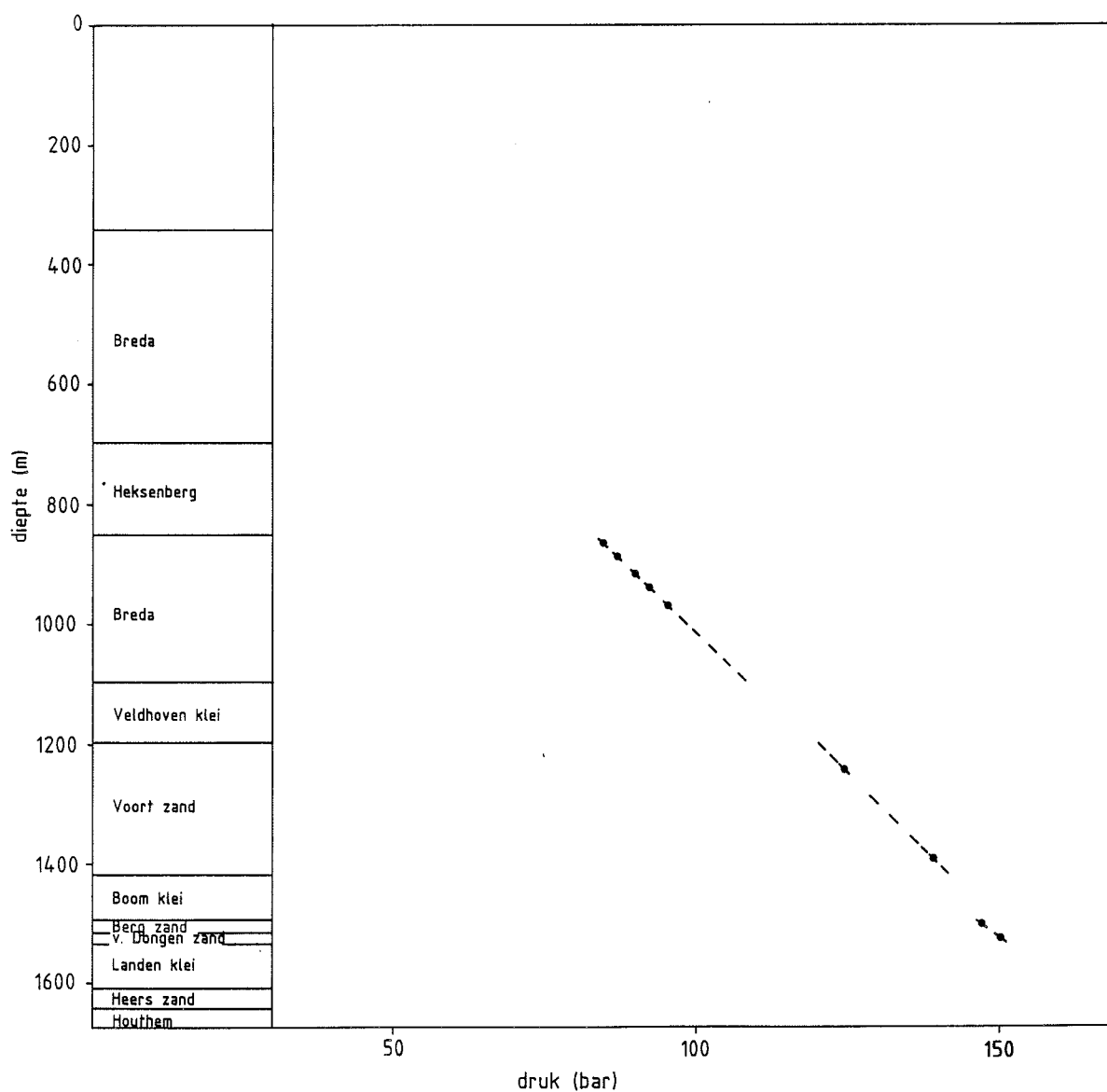
Bij het ontwerp van de putproef is het drukverloop zowel voor een eindig als voor een oneindig uitgestrekt reservoir gesimuleerd.

Het lag in de bedoeling om de reiniging en ontwikkeling van de put en de uitvoering van een putproef - produktie test plus "buildup" - qua tijdstip te scheiden; reiniging en ontwikkeling van de put zou direct na het afwerken van de put met behulp van stikstof lift geschieden, de eigenlijke putproef zou enige tijd later, na de ontruiming van de boorlokatie worden uitgevoerd met behulp van een onderwaterpomp. Echter tijdens het ontwikkelen van de put bleek het haalbare produktiedebiet - ook na het "zuren" van de put - aanzienlijk lager dan op grond van de voorlopige evaluatie kon worden verwacht. Debiet en afpompings waren dusdanig dat de oorspronkelijk ontworpen produktietest niet zinvol kon worden uitgevoerd. Derhalve is de "permeabiliteits"meting van het Zand van Berg beperkt tot de waarnemingen gedurende de ontwikkeling van de put. Evenwel, kon uit deze waarnemingen slechts een indicatieve waarde voor de produktiviteits index van de put worden afgeleid.

4.3.4 Formatiedrukken

Over het algemeen zijn de formatiedrukken in Nederland hydrostatisch, hetgeen wil zeggen dat op een zekere diepte de druk overeenkomt met het gewicht van de waterkolom die er bovenop drukt. Drukgradiënten kunnen echter variëren omdat de dichtheid van het water afhankelijk is van het zoutgehalte (vgl. hoofdstuk 3).

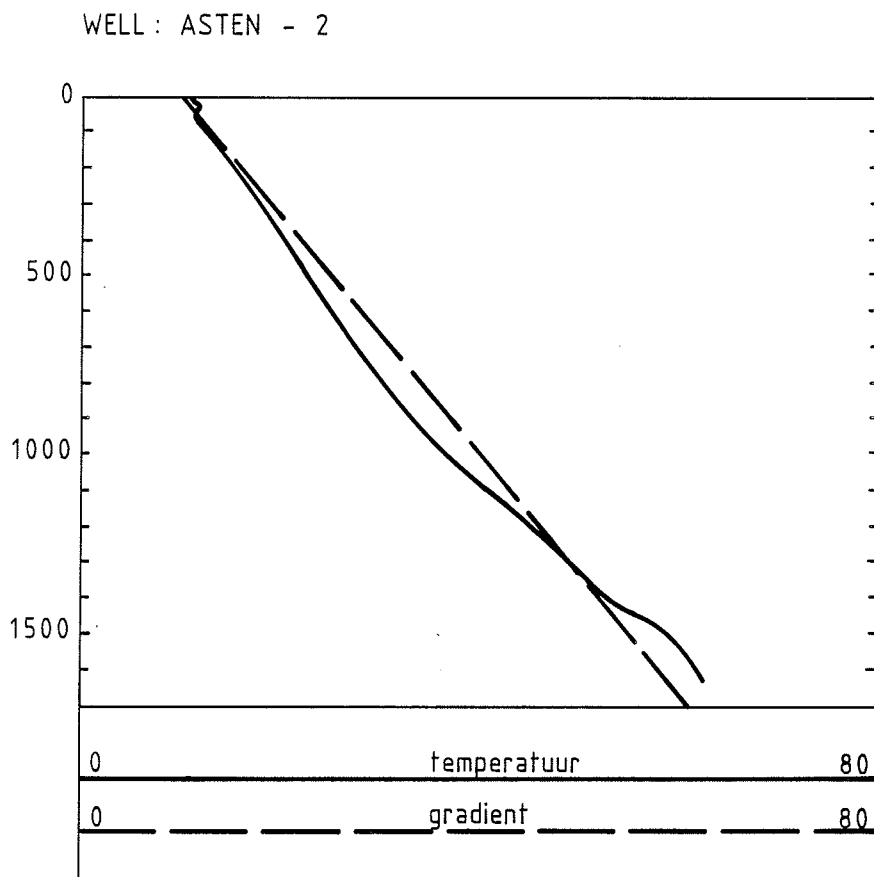
Uit de RFT metingen kan voor verschillende formaties het drukverloop met de diepte worden bepaald (figuur 4.9).



Figuur 4.9 Het drukverloop uit RFT metingen met de diepte.

4.3.5 Temperatuur

Ten gevolge van het doorboren van formaties en het rondpompen van spoeling, wordt de natuurlijke temperatuurgradiënt in de aarde verstoort. Na verloop van tijd zal de natuurlijke situatie zich herstellen. Daarom is in de put Asten-2, twee maanden na afloop van de boorwerkzaamheden een temperatuurmeting gemaakt (figuur 4.10).

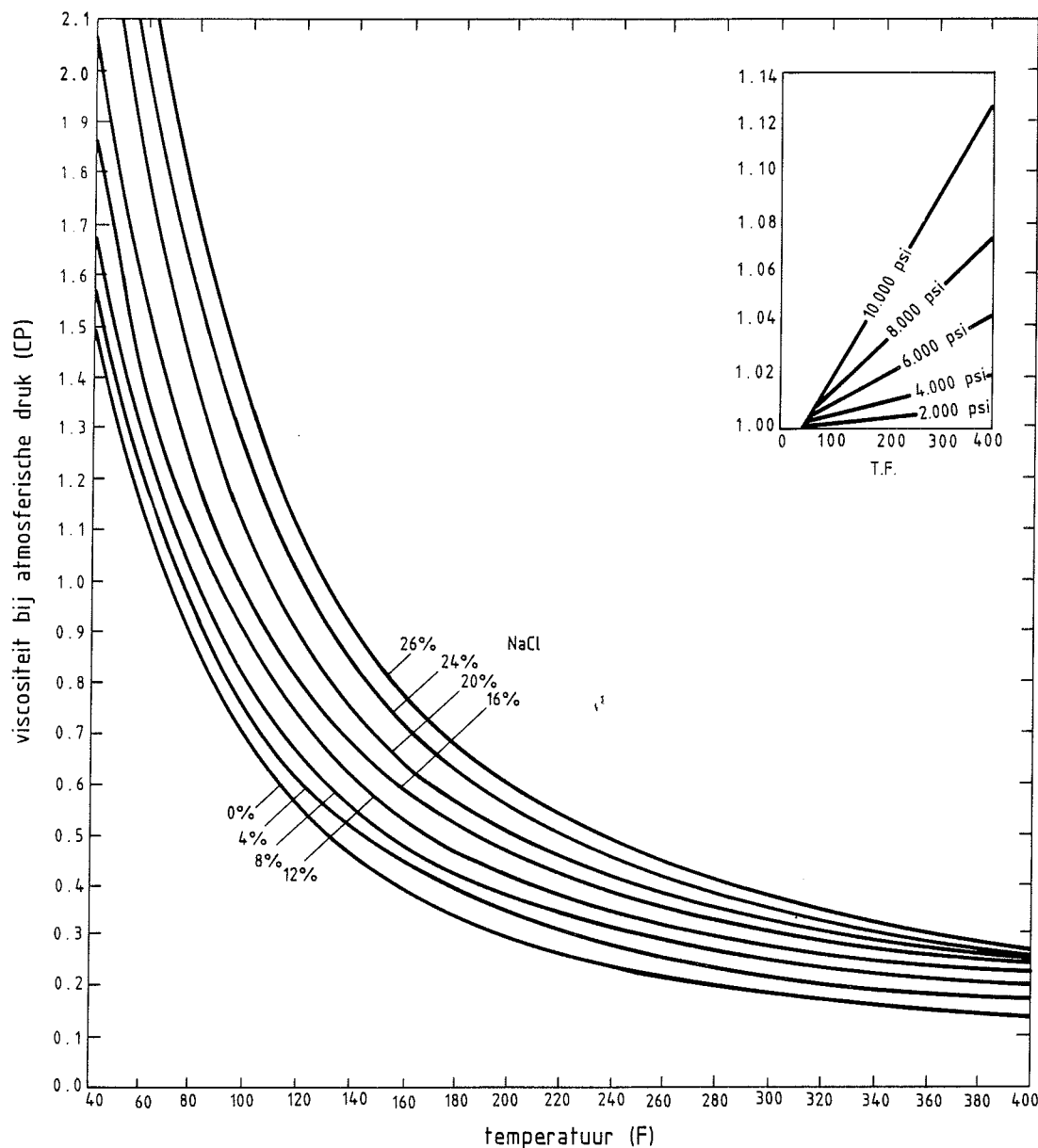


Geothermische gradiënt .

Figuur 4.10 Het temperatuurverloop met de diepte en de temperatuurgradiënt.

4.3.6 Viscositeit

Uit de boorgatmetingen kon worden afgeleid dat de doorboorde formaties zoals verwacht alleen water bevatten. De viscositeit van het water is een functie van de temperatuur, het zoutgehalte en de formatiedruk en kan uit de gedane metingen worden bepaald (figuur 4.11).



Figuur 4.11 De viscositeit van formatiewater als functie van zoutgehalte (NaCl), temperatuur en druk.

4.3.7 Produktiviteitsindex

Om het geothermisch potentieel van een formatie te kunnen bepalen is het nodig te weten hoeveel water van welke temperatuur aan de formatie kan worden onttrokken.

Aangezien het altijd mogelijk is een formatie meer te laten produceren door er harder aan te onttrekken wordt de produktiviteit van een formatie aangegeven door de produktiviteitsindex (PI): de produktiesnelheid per eenheid van drukdaling.

Met behulp van de 'steady state equation' kan de produktiviteitsindex worden berekend:

$$PI = \frac{2 \pi k h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}, \quad (4.6)$$

waarin

k	= permeabiliteit	
h	= dikte formatie	
μ	= viscositeit water	
r_w	= put straal	(2,25 inch of 0,05715 m)
r_e	= straal van onttrekkingsgebied	(gemiddelde straal breukblok Asten, 3200 m)

Hierbij is aangenomen dat het maximale onttrekkingsgebied overeenkomt met de grootte van het breukblok waarin de put zich bevindt (ca. 32 km²).

De putstraal volgt direct uit het putontwerp (figuur 1.3).

4.4 Resultaten

Achtereenvolgens zullen de, in de boring Asten-2 aangetroffen produktieve eenheden worden geëvalueerd.

4.4.1 Kakert laagpakket: 850 - 1093 m

Dit is het zandlichaam van de Formatie van Breda onder de Formatie van Heksenberg. Uit de geologische beschrijving blijkt dat het gaat om een kleilig glauconiethoudend pakket. Tabel 4.3 geeft de porositeit- en vloeistofpermeabiliteit voor de opeenvolgende deelintervallen in dit

pakket, zoals die uit de logs zijn gebleken. De bijbehorende dikte en transmissiviteit (kh-waarde) zijn eveneens in tabel 4.3 weergegeven. Uit de tabel volgt dat indien 5000 mDm als afbreekcriterium wordt aangehouden, in het Kakert Laagpakket een produktieve zone van 59 m dik (939 - 998 m) aanwezig is. De gemiddelde porositeit over deze zone is 40%. De totale transmissiviteit van deze zone is 48 500 mD.m (= $48,5 \times 10^{-12} \text{ m}^3$).

Diepte	Dikte	Porositeit	Permeabiliteit	Transmissiviteit
[m]	[m]	[%]	[mD]	[mDm]
860 - 872	12	36	110	1320
872 - 879	7	26	4	28
879 - 888	9	39	350	3150
888 - 898	10	26	5	50
898 - 923	25	35	80	2000
923 - 939	16	24	2	32
939 - 978	39	42	1090	42 500
978 - 998	20	38	300	6000

Tabel 4.3 Formatie parameters van het Kakert laagpakket.

Uit de chemische analyse blijkt dat het gemiddelde vochtgehalte 25,3% is en dat het chloridegehalte 5600 ppm bedraagt. Een chloridegehalte van 5600 ppm komt overeen met een NaCl gehalte van 0,97%. De temperatuurgradiënt over de Formatie van Breda is 0,033 °C/m. De gemiddelde temperatuur over de bestudeerde zone is 35,5 °C (=95,9 °F). De heersende druk is gemiddeld 95 bar. Uit figuur 4.11 blijkt dat bij de heersende temperatuur, druk en saliniteit, de dynamische viscositeit van het water 0,75 cp bedraagt (= $7,5 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$) (Meenan, 1980). De produktiviteitsindex van de produktieve zone in het Kakert Laagpakket bedraagt derhalve,

$$PI = 3,72 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]^2 = 13,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / \text{bar} \quad . \quad (4.7)$$

4.4.2 Zand van Voort: 1196 - 1415,7 m

Dit is het zandlichaam onderin de Formatie van Veldhoven. De lithologie bestaat uit fijne tot uiterst fijne kleiige zanden en zandige kleien, met variërende gehalten aan glauconiet.

Uit de boorgatmetingen is gebleken dat het totale pakket 219 m dik is. De gemiddelde porositeit bedraagt 32% en de gemiddelde permeabiliteit van het gesteente is slechts 7 mD. De transmissiviteit van dit pakket komt hiermee op 1533 mD.m (= $1,53 \times 10^{-12} \text{ m}^3$). Het gemiddelde vochtgehalte is bepaald op 15,9% en het chloridegehalte op 32 000 ppm. Dit komt overeen met een NaCl gehalte van 5,6%. De temperatuurgradiënt in het Zand van Voort bedraagt 0,039 °C/m. De gemiddelde temperatuur is 49,2 °C (= 120,6 °F). Met een gemiddelde druk van 130 bar leidt dit tot een dynamische viscositeit van 0,64 cp (= $6,4 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$) (Meenan, 1980).

De produktiviteitsindex van het Zand van Voort is:

$$PI = 0,14 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]^2 = 0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / \text{bar} \quad . \quad (4.8)$$

4.4.3 Zand van Berg: 1494 - 1513 m

- Formatie evaluatie op basis van boorgat- en kernmetingen

Dit is het zandpakket onderin de Formatie van Rupel. Het bestaat uit fijnkorrelige glauconiethoudende zanden. Het vochtgehalte is 13,5%. Het Zand van Berg is 19 m dik, heeft een gemiddelde porositeit van 35% en een gemiddelde permeabiliteit van 370 mD. De transmissiviteit is 6970 mD.m (= $6,97 \times 10^{-12} \text{ m}^3$). Het chloridegehalte is 20 300 ppm. Dit komt neer op een NaCl gehalte van 3,5%. De temperatuurgradiënt is beduidend lager dan in de bovenliggende lagen: 0,023 °C/m. De gemiddelde temperatuur in het Zand van Berg is 59,5 °C (= 139,1 °F) en de heersende druk is 147 bar. De dynamische viscositeit is hierbij 0,51 cp (= $5,1 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$) (Meenan, 1980).

De produktiviteitsindex van het Zand van Berg komt hiermee op:

$$PI = 0,78 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]^2 = 2,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / \text{bar} \quad . \quad (4.9)$$

- Resultaten putproef

Uit de resultaten van een putproef kunnen de gemiddelde permeabiliteit van de desbetreffende formatie alsmede de produktiviteitsindex van de put worden afgeleid. Voor een betrouwbare bepaling van de gemiddelde

formatiepermeabiliteit is een langdurige putproef noodzakelijk.

De produktiviteitsindex van de put als zodanig is afhankelijk van de formatie permeabiliteit en het ontwerp en de afwerking van de put. De produktiviteitsindex van een put kan als volgt worden berekend uit de waarnemingen gedurende een putproef:

$$PI_{\text{put}} = \text{debiet [m}^3/\text{h]}/\text{totale afpompingsdruk in [bar]} \quad .$$

Gebruik makende van de ontoereikende waarnemingen van afpompingsdruk en debiet gedurende de reiniging en de kortstondige ontwikkeling van de put door middel van stikstof (N₂) lift, kan een indicatieve waarde voor de produktiviteitsindex van de put worden afgeleid;

$$PI_{\text{put}} = \text{circa } 0,2 \text{ [m}^3/\text{h]}/\text{bar} \quad .$$

De aldus bepaalde produktiviteitsindex bedraagt slechts één tiende van de produktiviteitsindex berekend uit boorgat- en kernmetingen. Echter vanwege onder andere de onzekerheid omtrent de effectieve filterlengte zijn beide waarden niet goed vergelijkbaar. Op grond van het feit dat tegen het einde van de test de produktiviteit bij een verminderende afpompingsdruk nog steeds toenam kan worden verondersteld dat de uiteindelijke produktiviteitsindex van de put circa 0,5 tot 1,0 [m³/h]/bar zal bedragen. Het ligt in de bedoeling om deze waarde op een later tijdstip te verifiëren.

4.4.4 Basaal Zand van Dongen: 1513,5 - 1530 m

Dit is het enige aanwezige pakket uit de Formatie van Dongen. Het bestaat uit siltige, glauconiethoudende schalies. Het vochtgehalte is 13,8%.

Het pakket is 17 m dik, heeft een gemiddelde porositeit van 24% en een gemiddelde permeabiliteit van 3 mD. De transmissiviteit is 48 mD.m (= 0,05 × 10⁻¹² m³). Het chloridegehalte is 27 800 ppm. Dit komt neer op een NaCl gehalte van 4,7%. De temperatuurgradiënt is 0,023 °C/m. De temperatuur is 60 °C (= 140 °F) en de druk is ongeveer 150 bar. De dynamische viscositeit komt hiermee op 0,51 cp (= 5,1 × 10⁻⁴ Ns/m²) (Meenan, 1980).

De produktiviteitsindex van het Basaal Zand van Dongen is:

$$PI = 0,01 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3/\text{s}}{[\text{N}/\text{m}^2]} = 0,02 \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{bar}} \quad . \quad (4.10)$$

4.4.5 Zand van Heers: 1607 - 1636 m

Dit is het zandlichaam van de Formatie van Landen. Het heeft een sterk wisselend karakter, variërend van humeuze zanden tot kalkige kleistenen en glauconiethoudende zanden. In tabel 4.4 is de porositeit en permeabiliteit van de verschillende deelintervallen weergegeven, alsmede de dikte en de transmissiviteiten. De gemiddelde porositeit van deze zone is 38%. De transmissiviteit van het gehele traject bedraagt 2730 mD.m (= $2,73 \times 10^{-12} \text{ m}^3$). Er is geen chemische analyse uitgevoerd van het water in dit pakket. Voor de viscositeit is dezelfde waarde aangenomen als in het Basaal Zand van Dongen: 51 cp (= $5,1 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$).

De produktiviteitsindex van de produktieve zone in het Zand van Heers is:

$$PI = 0,31 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} / \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = 1,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} / \text{bar} \quad (4.11)$$

Diepte [m]	Dikte [m]	Porositeit [%]	Permeabiliteit [mD]	Transmissiviteit [mDm]
1607 - 1612	5	34	60	300
1612 - 1619	7	12	-	-
1619 - 1622	3	37	175	530
1622 - 1628	6	29	1	6
1628 - 1632	4	37	175	700
1632 - 1636	4	39	300	1200

Tabel 4.4 Formatie parameters van het Zand van Heers.

4.4.6 Formatie van Houthem: 1636 - einddiepte

Dit is een kalkafzetting uit het Onder Paleoceen, die sterke overeenkomst vertoont met de jongste sedimentstapel uit het Boven Krijt. De Formatie van Houthem wordt daarom tot dezelfde groep gerekend: de 'Chalk Group'. De formatie bestaat uit zachte witte, fijn- tot grofkorrelige kalksteen. In deze kalksteen is waarschijnlijk een breuksysteem aanwezig, dat opgevuld is met zand. Dit breuksysteem zorgt voor de permeabiliteit van Formatie van Houthem.

Indicatoren voor de mogelijke aanwezigheid van breuken zijn de amplitude van de shear wave, die ter plaatse erg laag wordt, de separatie tussen de "shear wave amplitude" en de "compression wave

amplitude", die ter plaatse kleiner dan nul wordt en 'chevron patterns' op een "micro seismogram" log (Suau, undated). Op grond van deze logs kan worden geconcludeerd dat in het interval 1641 - 1651 m de meeste breuken zitten. De porositeit in de Formatie van Houthem is uit de "delta t sonic" log bepaald. De gemiddelde waarde over het gehele interval is 23%. De porositeit in de breuken worden hoger geacht.

Om de permeabiliteit van de formatie (matrixpermeabiliteit) en de permeabiliteit in de breuken (spleetpermeabiliteiten) te bepalen, is een putproef uitgevoerd.

Met behulp van een gevoeligheidsanalyse is bepaald binnen welke begrenzungen de waarden voor de porositeit en permeabiliteit liggen:

- matrix permeabiliteit: $9,04 \times 10^{-6}$ - 0,35 mD
- matrix porositeit: 16 - 25%
- spleet volume : 0,025 - 12,2% van het totaal volume
- spleet permeabiliteit: 24 - 34,6 mD.

Hieruit blijkt dat eigenlijk alleen de matrixporositeit en de spleet permeabiliteit met redelijke nauwkeurigheid bepaald konden worden.

Uit de test is verder naar voren gekomen, dat de reservoirdruk 156 bar is. De produktiviteitsindex voor de Formatie van Houthem, gemeten tijdens de test, bleek erg laag te zijn: 0,6 [m³/h]/bar. De temperatuur die in de Formatie van Houthem is gemeten bedraagt 62,9 °C.

4.5 Conclusies

Van de onderzochte formaties bezitten slechts enkele voldoende produktiviteit om voor geothermisch reservoir in aanmerking te komen. Een oorspronkelijk target, het Basaal Zand van Dongen, heeft een te lage produktiviteitsindex om economisch warmte te kunnen produceren $PI = 0,02$ [m³/h]/bar. Ook de Formatie van Houthem, die in tweede instantie als target werd gezien, heeft een tegenvallende produktiviteitsindex $PI = 0,6$ [m³/h]/bar.

Hetzelfde geldt voor het Zand van Voort met een produktiviteitsindex $PI = 0,5$ [m³/h]/bar.

Formatie	Porositeit [%]	Temperatuur [°C]	Temperatuur	Productiviteits- Index [m ³ /h]/bar
			Gradiënt [°C/m]	
Breda	40	35,5	0,033	13,7
Voort	32	49,2	0,039	0,5
Berg	35	59,5	0,023	2,9
	-	-	-	0,2* (0,5-1,0)
Dongen	24	60,0	0,023	0,02
Heers	38	62,3	0,023	1,1
Houthem	23	62,9	0,023	0,60*

* produktiviteitsindex van de put ontleend aan putproef

Tabel 4.5 Resultaten van de formatie evaluatie.

De belangrijkste resultaten van de formatie evaluatie zijn weergegeven in tabel 4.5. Van evaluatie van de boorgatmetingen en de kernen is gebleken dat in de Formatie van Breda (Kakert Laagpakket) en in het Zand van Berg zones aanwezig zijn, die eventueel voldoende produktiviteit bezitten om voor geothermische exploitatie in aanmerking te komen. De produktiviteitsindex (PI) bedraagt voor beide formaties respectievelijk $PI_{Breda} = 13,7 \text{ [m}^3/\text{h]}/\text{bar}$; $PI_{Berg} = 2,9 \text{ [m}^3/\text{h]}/\text{bar}$. Uit een putproef is echter gebleken dat de produktiviteit van het Zand van Berg ter plaatse lager uitvalt; $PI_{put} = \text{circa } 0,5 \text{ [m}^3/\text{h]}/\text{bar}$. De proefboring heeft aangetoond dat het gebruik van geologische inventarisatiestudies voor het schatten van de geothermische reserves met grote voorzichtigheid dient te geschieden.

5. VALIDATIE VAN PERMEABILITEITSBEPALINGEN AAN KORRELGROOTTE
VERDELINGEN

5.1 Inleiding

De permeabiliteit en de porositeit van zandige afzettingen kan worden bepaald door diverse directe en indirecte methoden. In hoofdstuk 4 is reeds ingegaan op een aantal directe en indirecte manieren om de porositeit te bepalen. Ook directe permeabiliteitsmetingen zijn daar besproken. Er bestaan echter ook methoden om op indirecte wijze de permeabiliteit te schatten, wanneer de vaak kostbare directe bepalingen niet beschikbaar zijn.

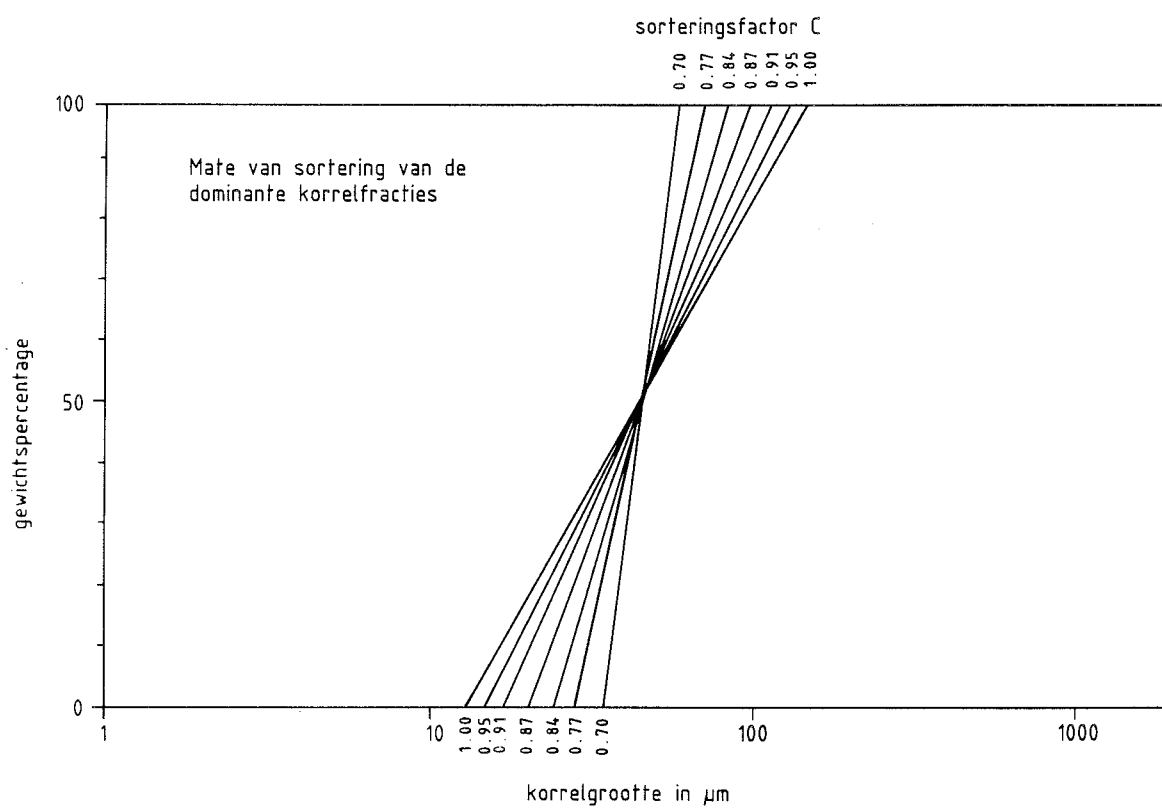
In het rapport "Permeabiliteit, porisiteit en kleigehalte van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Nederland" (Speelman en Breunese, 1985) worden een aantal methoden vergeleken, die gebaseerd zijn op analyse van de korrelgrootteverdelingen. Deze methoden, waarvan de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid over het algemeen geringer is dan die van directe methoden, kunnen worden vergeleken met metingen aan kernen. Speelman en Breunese hadden slechts een beperkt aantal monsters tot hun beschikking die bovendien afkomstig waren van veel verschillende lokaties en formaties.

De beschikbaarheid van diverse kernen in de boring Asten-2, waaraan zowel directe metingen als indirecte bepalingen konden worden gedaan, biedt de mogelijkheid om de door Speelman en Breunese getrokken conclusies op hun geldigheid voor de in Asten aangetroffen formaties te toetsen.

In de boring Asten-2 zijn de volgende trajecten gekernd:

- 904 - 906 m: Formatie van Breda
- 1229 - 1247 m: Zand van Voort
- 1502 - 1515 m: Zand van Berg
- 1515 - 1524 m: Basaal zand van Dongen
- 1524 - 1535 m: Klei van Landen.

Uit deze kernen zijn om de 30 cm pluggen getrokken waaraan directe permeabiliteitsmetingen zijn gedaan. Deze pluggen zijn vervolgens gebruikt voor een korrelgrootte analyse zodat een goede vergelijking tussen directe en indirecte methoden mogelijk is.



Figuur 5.1 Sorteringsfactor volgens Van Baaren.

5.2 Indirecte methoden

De permeabiliteit van een afzettingsgesteente kan worden beschouwd als een geometrische parameter, die kan worden afgeleid uit andere geometrische parameters van het gesteente. De afgelopen 60 jaar zijn tientallen theoretische, semi-empirische en empirische relaties ontwikkeld, waarbij de permeabiliteit gerelateerd wordt aan andere gesteenteparameters. De korrelgrootte, de sortering, en de porositeit (zie hoofdstuk 4) worden in het algemeen als belangrijke parameters voor de bepaling van de permeabiliteit beschouwd (Van Baaren, 1978).

In het rapport van Speelman en Breunese (Speelman en Breunese, 1985) worden de belangrijkste methoden beschreven. De onderstaande beschrijving van deze methoden is aan genoemd rapport ontleend;

- Indien gedetailleerde gegevens, betreffende twee elementen van korrelgrootteverdeling (nl. de - dominante - korrelgrootte en sortering ervan) als ook de porositeit beschikbaar zijn, kunnen semi-empirische methoden worden toegepast waarmee indicaties betreffende de permeabiliteit kunnen worden verkregen.

Een voorbeeld van een dergelijke semi-empirische methode is beschreven door Van Baaren (Van Baaren, 1978). Hierbij wordt tevens rekening gehouden met de mate van consolidatie van de afzettingen. De nauwkeurigheid van de aldus bepaalde permeabiliteitswaarden is gedegen geverifieerd door middel van permeabiliteitsbepalingen aan boorkernen.

- Indien er alleen gegevens, betreffende één element van de korrelgrootteverdeling - nl. de korrelgrootte bij een zeker gewichtspercentage -, en betreffende de porositeit beschikbaar zijn, kan de methode van Kozeny-Carman worden toegepast. Deze veel gebruikte methode is ontwikkeld door Kozeny (Kozeny, 1927) en gemodificeerd door Carman (Carman, 1937).

- Indien uitsluitend gegevens betreffende de korrelgrootteverdeling beschikbaar zijn, kan bijvoorbeeld de methode van Breddin (Breddin, 1961) worden toegepast.

De nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de resultaten, die uit dergelijke methoden verkregen worden, is afhankelijk van de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van de gebruikte gegevens

betreffende de korrelgrootteverdeling en de porositeit. Nauwkeurige gegevens over de korrelgrootteverdeling kunnen worden verkregen door middel van korrelgrootte-analysen van gesteentemonsters; gegevens betreffende de porositeit kunnen ontleend worden aan metingen aan kernen en analyse van porositeitslogs.

De methode van Van Baaren (1978) is gebaseerd op de relatie:

$$k_V = 10 d_{dom}^2 \cdot C^{-3,64} \cdot \phi^{(m+3,64)} \quad , \quad (5.1)$$

met

k_V = ('Van Baaren'-) permeabiliteit [mD]

d_{dom} = dominante korrelgrootte [μm]

C = sorteringsfactor [-]

ϕ = porositeit (fractie) [-]

m = cementatiefactor [-]

De dominante korrelgrootte [d_{dom}] kan worden afgeleid uit de korrelgrootte-analysen. De sorteringsfactor [C] betreft de mate van sortering van de dominante korrelfracties. Deze fracties bepalen grotendeels de poriënstructuur van de afzetting waaruit het monster afkomstig is. In figuur 5.1, samengesteld ten behoeve van dit onderzoek, zijn de waarden van C voor de verschillende sorteringsfactoren weergegeven.

Hiermee kan de mate van sortering uit de korrelgrootte-analysen worden afgeleid. De waarden voor de porositeit [ϕ] zijn bepaald door middel van metingen aan boorkernen. De mate van consolidatie van de afzettingen waaruit de monsters afkomstig zijn wordt uitgedrukt door middel van de cementatiefactor [m]. In alle gevallen waar de methode Van Baaren is toegepast, bestaan de afzettingen uit ongeconsolideerd tot kruimelig verkit zand, waarbij voor m een waarde van 1.4 is toegepast.

De methode van Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1937; in: Bear, 1972) is gebaseerd op de relatie:

$$k_C = 5,53 d_{10}^2 \left\{ \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \right\} \quad , \quad (5.2)$$

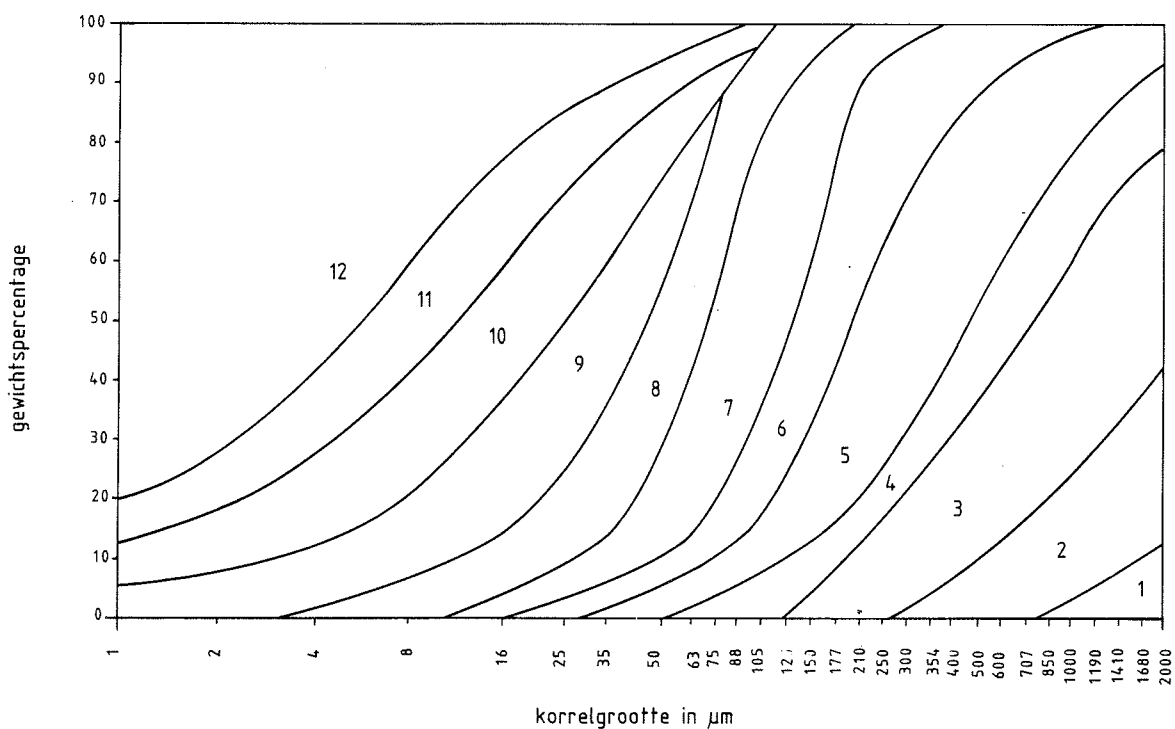
k_C = ('Kozeny-Carman-') permeabiliteit [mD]

d_{10} = korrelgrootte bij gewichtspercentage 10 [μm]

ϕ = porositeit [-]

De korrelgrootte bij een gewichtsperscentage van 10 [d_{10}] kan worden afgeleid uit de korrelgrootte-analysen. Voor de porositeit zijn bij deze methode dezelfde waarden gebruikt als bij de berekeningen met de methode van Van Baaren.

De methode van Breddin (1961) is gebaseerd op analyse van korrelgrootteverdelingen. Er worden 12 klassen van korrelgrootteverdelingen onderscheiden, waarbij aan elk van de klassen een bepaalde waarde voor de permeabiliteit wordt toegekend. De indeling in klassen en de daaraan gerelateerde waarden voor de permeabiliteit zijn weergegeven in figuur 5.2. De permeabiliteit kan worden afgeleid door vergelijking van de resultaten van de korrelgrootte-analysen met de korrelgrootte-curven in figuur 5.2. Indien een curve in meerdere klassen valt, wordt een

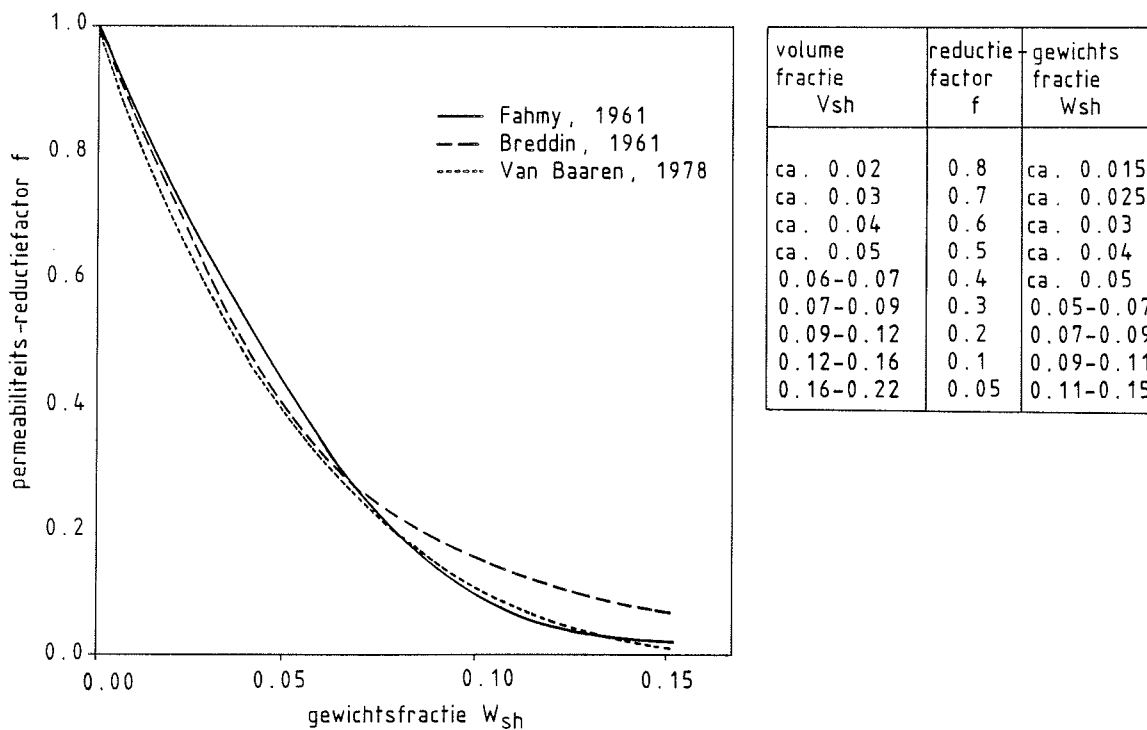


Figuur 5.2 Klasse van korrelgrootteverdeling volgens Breddin.

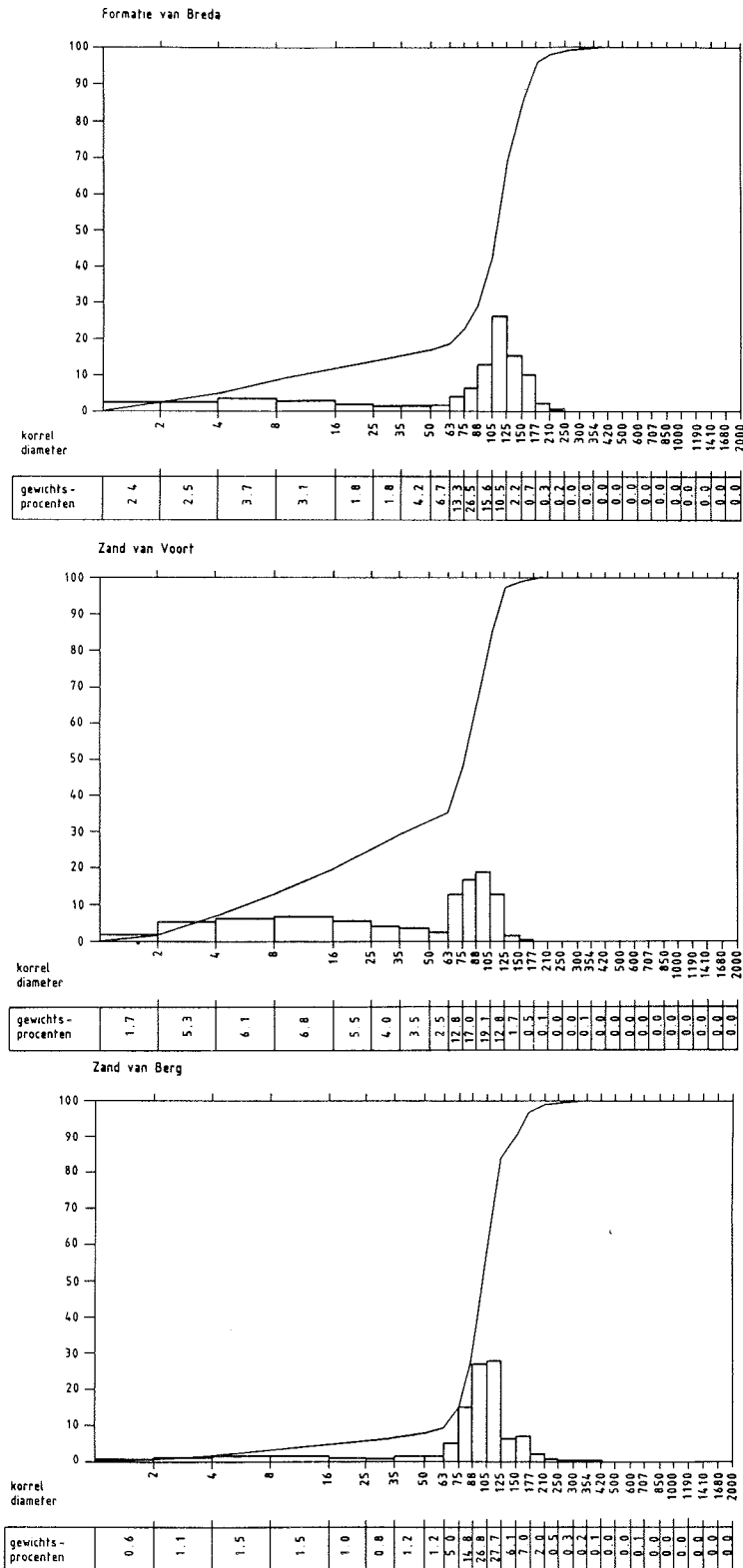
gemiddelde klasse geselecteerd, waarbij de hogere klassen (overeenkomend met lagere waarden voor de permeabiliteit) een zwaarder gewicht krijgen.

De Breddin-classificatie wordt voornamelijk bepaald door de dominante gewichtsfractie (overeenkomend met het gedeelte van de korrelgrootteverdeling waar de curve het steilst is).

De onderzochte monsters blijken op grond hiervan alle in één van de klassen 4-8 te vallen.



Figuur 5.3 Permeabiliteits-reductiefactor als functie van de fractie (niet-zwellende) klei en fijn silt (korrelgrootte 16 µm).



Figuur 5.4 Karakteristieke korrelgrootteverdeling voor drie onderzochte formaties.

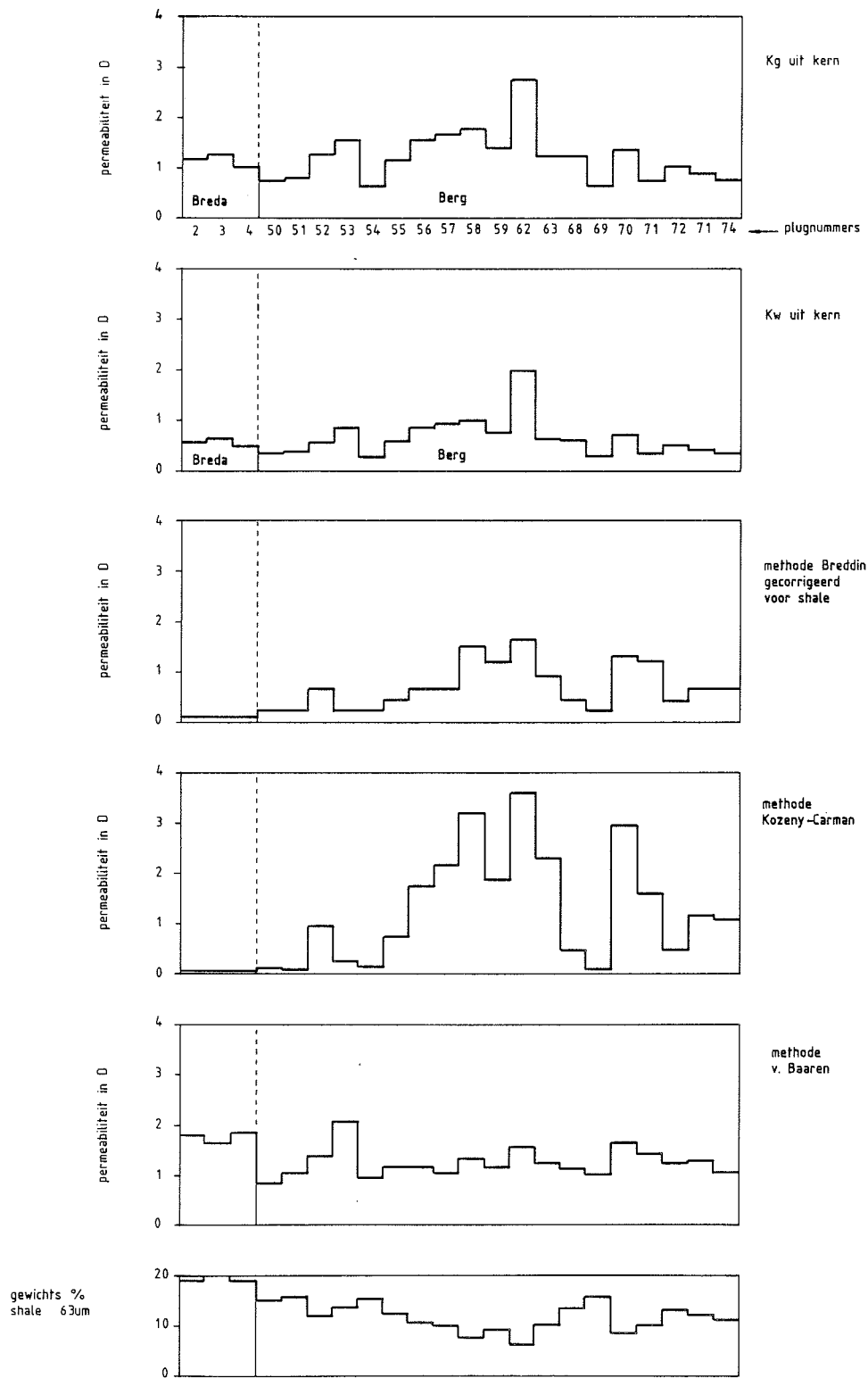
Bij het vergelijken van de gemeten korrelgrootteverdelingen met de Breddin-verdelingen valt echter te constateren dat in de gemeten verdelingen veelal een aanzienlijk hoger percentage klei en fijn silt (fractie < 16 μm) voorkomt dan in de overeenkomende Breddin-verdeling. In verband hiermee is bij de permeabiliteitsbepalingen met de methode van Breddin een reductiefactor toegepast. Hiervoor is gebruik gemaakt van de in figuur 5.3 vermelde permeabiliteits-reductiefactoren waarvan de waarde afhankelijk is van het gehalte klei en fijn silt.

5.3 Resultaten voor de Asten-2 boring

Aan een groot aantal gesteentemonsters uit de Formatie van Breda, het Zand van Voort, het Zand van Berg, het Basaal Zand van Dongen en de Klei van Landen zijn korrelgrootte verdelingen bepaald. Van de belangrijkste zanden is in figuur 5.4 een karakteristieke verdelings-curve weergegeven. De Formatie van Breda heeft in het betreffende monster een dominante korrelgrootte van 115 μm en een siltfractie (< 63 μm) van 9.1%. Het Zand van Voort is slecht gesorteerd, heeft een hoog siltgehalte en is derhalve laag permeabel. Het Zand van Berg is over het algemeen een goed reservoirzand met een goede sortering en een lage siltfractie.

De genoemde semi-empirische methoden zijn eigenlijk alleen geschikt voor relatief schone zanden. Voor alle gesteentemonsters met een siltfractie kleiner dan 20% is met de methode van Van Baaren, van Kozeny-Carman en van Breddin de permeabiliteit bepaald. De resultaten zijn weergegeven in tabel 5.1. Tevens zijn de resultaten onderling vergeleken in figuur 5.5.

Uit figuur 5.5 kan worden geconcludeerd dat de methode van Van Baaren de meeste overeenkomst vertoont met de aan de kern gemeten permeabiliteit. Ook Speelman en Breunese, 1985 kwamen tot deze conclusie. Opgemerkt moet echter worden dat deze overeenkomst slechts geldt voor de gaspermeabiliteit van de kernpluggen. Wanneer de formatie water bevat, moet de correctiefactor van figuur 4.6 worden toegepast. Het gewichtspercentage korrels met een diameter < 63 μm (silt) heeft een grote invloed op de afwijking tussen de indirecte en de directe permeabiliteit. Dit geldt het sterkst voor de relatie van Kozeny-Carman



Figuur 5.5 Vergelijking van directe en indirecte methoden voor permeabiliteitsbepaling.

waarin de korrelgrootte bij gewichtspercentage 10 verwerkt is. In mindere mate wordt de methode van Van Baaren hierdoor beïnvloed omdat hierin de dominante korrelgrootte is opgenomen. De methode Breddin, waarbij de gehele korrelgrootteverdelingscurve van belang is, wordt hierdoor het minst verstoord.

Een nadere analyse van de invloed van silt op de permeabiliteit, bepaald volgens Van Baaren, leert dat de permeabiliteit te hoog geschat wordt bij hoge silt percentages en te laag bij lage percentages. Voor het zand van Berg ligt het omslagpunt rond 12% (zie ook figuur 5.6 en 5.7).

Om de methode van Van Baaren te corrigeren voor het siltgehalte, dient de bestaande relatie (5.1) te worden uitgebreid met een correctieterm waarin het gewichtspercentage silt (W_{63}) is opgenomen. Wanneer een correctieterm met de gedaante ($aW_{63} - b$) wordt toegepast, zal de relatie (5.1) wijzigen in:

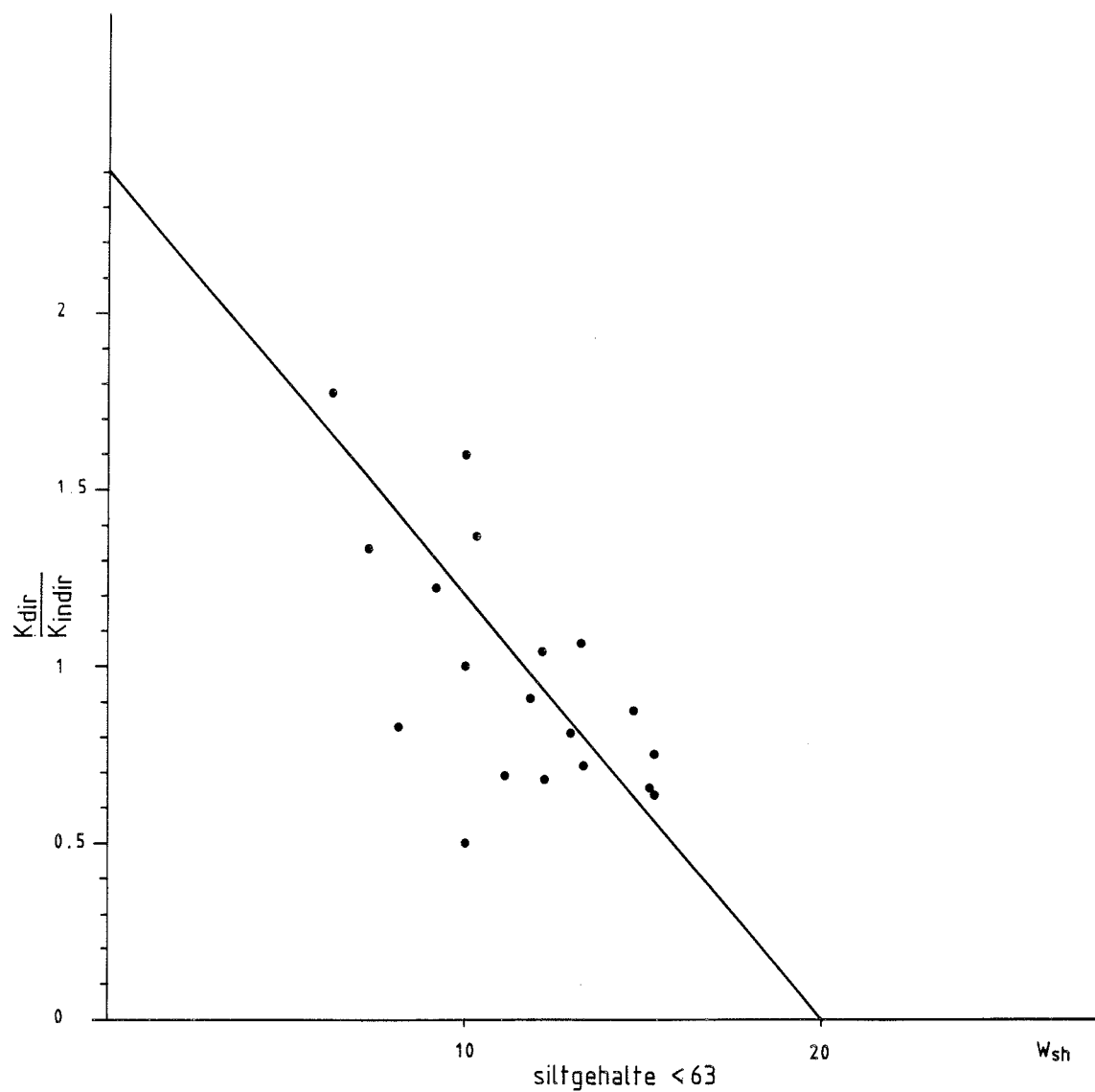
$$k_v = 10 d_{dom}^2 C^{-3,64} \phi^{(m + 3,64)} + (a W_{63} - b) \quad (5.3)$$

De parameters a en b kunnen empirisch worden bepaald met behulp van de vloeistof permeabiliteitswaarden gemeten aan de kernpluggen. Voor het Zand van Berg in Asten werden de volgende waarden bepaald:

$$a = 205$$

$$b = 2370$$

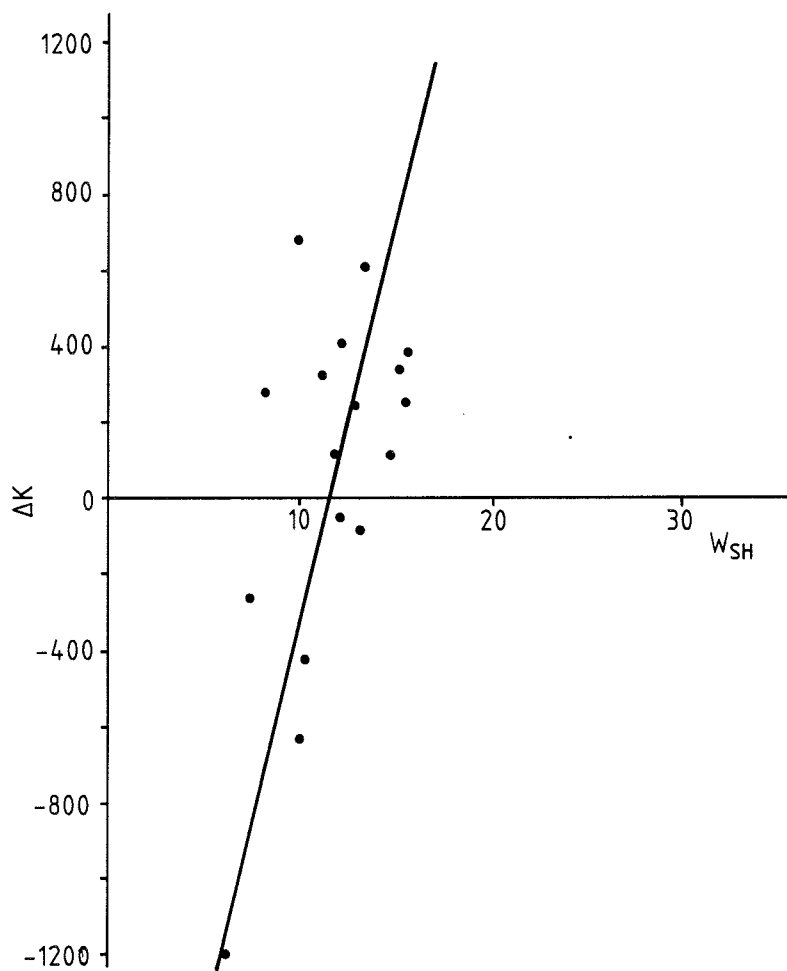
Daar voor de Formatie van Breda slechts van 3 kernpluggen de benodigde gegevens over korrelgrootteverdeling, porisiteit en de vloeistof permeabiliteit beschikbaar waren, kon voor deze formaties geen correctieterm worden bepaald.



Figuur 5.6 Verhouding van directe en indirecte permeabiliteitsbepaling als functie van het "shale" gehalte (< 63 μ).

Formatie	sample nummer	diepte	permeabiliteit		porositeit	indirecte permeabiliteit			gewichtspercentage silt	
			gas	water		v. Baaren	Breddin			Cozeny-Carman
							ongecorrigeerd	gecorrigeerd voor silt		
Formatie van Breda	CORE 1									
	1	904.33								
	2	904.80	1190.00	583	38.2	1790	2100	105	66.7	19.1
	3	905.16	1270.00	630	37.2	1635	2100	105	53.6	19.8
	4	905.43	1020.00	480	38.8	1865	2100	105	86.2	18.9
	5	905.69	1230.00		41.0					
	6	906.05 906.08	2220.00		41.0					
Zand van Voort	113	1229.10	19.00		30.0					siltpercentage > 30%
	114	1229.60	7.52		30.4					
	115	1230.10	7.25		31.2					
	116	1230.60	7.33		31.7					
	117	1231.10	26.40		32.9					
	118	1231.60	11.90		33.0					
	119	1232.10								
	120	1232.60	24.70		30.5					
	121	1233.10								
	122	1233.60								
	123	1234.10								
	124	1234.70	6.51		29.3					
		1234.99								
	14	1240.15	8.50		30.6					
	15	1240.45	7.60		30.1					
	16	1240.75	17.50		30.7					
	17	1241.05	14.20		31.9					
	18	1241.35	13.10		31.3					
	19	1241.65	15.40		33.5					
	20	1241.95	18.00		32.3					
	21	1242.25	11.40		33.3					
	22	1242.55	7.90		33.0					
	23	1242.85	12.10		32.4					
	24	1243.15	10.70		32.4					
	25	1243.45	10.80		31.3					
	1238.00									

Tabel 5.1 Permeabiliteiten bepaald aan kernen en m.b.v. indirecte methodes.



Figuur 5.7 Verschil tussen directe en indirecte permeabiliteits-
bepaling als functie van het "shale" gehalte (< 63 μ).

Formatie	sample nummer	diepte	permeabiliteit		porositeit	indirecte permeabiliteit			gewichts- percentage silt		
			gas	water		v. Baaren	Breddin			Cozeny- Camman	
							onge- corri- geerd	gecor- rigeerd voor silt			
Zand van Voort	7	1238.05	49.80		31.8				siltpercentage > 30%		
	8	1238.35	30.60		31.4						
	9	1238.65	13.40		31.2						
	10	1238.95	13.00		32.2						
	11	1239.25	15.70		32.7						
	12	1239.55	23.00		33.6						
	13	1239.85	16.90		33.5						
	26	1243.75	10.10		32.5						
	27	1244.05	13.60		32.7						
	28	1244.35	11.10		33.2						
	29	1244.65	13.90		32.8						
	30	1244.95	9.50		32.7						
	31	1245.25	9.50		30.3						
	32	1245.55	7.70		31.5						
	33	1245.85	9.50		32.4						
	34	1246.15	20.20		33.8						
	35	1246.45	12.80		33.2						
	36	1246.75	12.70		32.7						
37	1247.05	43.50		31.5							
38	1247.35	101.00		31.2							
Zand van Berg	39	1502.80	638.00		35.6						
	40	1503.10	1350.00		36.8						
	41	1503.40	998.00		34.1						
	42	1503.70	622.00		33.5						
	43	1504.00	884.00		35.6						
	44	1504.30	307.00		30.1						
	45	1504.60	960.00		36.3						
	46	1504.90	244.00		31.4						
	47	1505.20	2520.00		37.6						
	48	1505.50	516.00		32.5						
	49	1505.80	1370.00		36.7						
	50	1506.10	748.00	330	34.1	858	2100	210		113	14.8
	51	1506.40	793.00	356	35.3	1046	2100	210		70.3	15.3
	52	1506.70	1270.00	630	35.6	1398	2100	620		962.5	11.9
	53	1507.00	1550.00	829	38.1	2161	2100	210		258	13.4
	54	1507.30	620.00	266	34.3	950	2100	210		132	15.2
	55	1507.60	1180.00	575	35.5	1134	2100	420		728	12.2
	56	1507.90	1550.00	829	35.6	1126	2100	620		1754	10.2
	57	1508.20	1670.00	920	34.8	1040	3000	630		2175	10.6
	58	1508.50	1780.00	990	36.3	1332	3000	1500		3194	7.3
	59	1508.80	1410.00	736	34.9	1152	3000	1200		1865	9.1
	60	1509.10	1710.00		35.8						
	61	1509.40	1900.00		37.9						
	62	1509.70	2740.00	1970	37.1	1536	3000	1600		3598	6.1
	63	1510.00	1220.00	600	35.2	1216	3000	900		2279	10.0
	64	1510.30	914.00		34.5						
	65	1510.60	1160.00		34.0						
	66	1510.90	1150.00		34.9						
	67	1511.20	382.00		32.8						
	68	1511.50	1210.00	590	35.0	1134	2100	420		439	13.2
	69	1511.80	651.00	280	33.8	1033	2100	210		82	15.6

Tabel 5.1 vervolg

Formatie	sample nummer	diepte	permeabiliteit		porositeit	indirecte permeabiliteit			gewichts- percentage silt	
			gas	water		v. Baaren	Breddin			Cozeny- Caman
							onge- corri- geerd	gecor- rigeerd voor silt		
Zand van Berg	70	1512.75	1350.00	695	36.6	1628	3000	1300	2938	8
	71	1513.25	713.00	313	35.5	1405	3000	1200	1608	10
	72	1513.75	1010.00	475	35.6	1253	2100	420	471	13
	73	1514.25	871.00	396	35.2	1284	2100	630	1163	12
	74	1514.72	716.00	316	34.4	1038	2100	630	1056	11
basaal zand van Dongen	75	1515.21	28.50		30.4					shale percentage > 70%
	76	1515.75	14.90		29.7					
	77	1516.28	8.13		22.6					
	78	1516.71	3.88		26.1					
	79	1517.25	9.14		24.3					
	80	1517.75	10.70		28.4					
	81	1518.22	28.30		30.7					
	82	1518.75	67.50		28.8					
	83	1519.25	2.42		23.7					
	84	1519.80	5.40		27.2					
	85	1520.28	16.40		29.4					
	86	1520.75	11.70		22.9					
	87	1521.25	6.58		24.1					
	88	1522.10	27.30		31.2					
89	1522.57	47.80		29.0						
90	1523.05	86.00		28.2						
91	1523.60	58.80		27.4						
Klei van Landen	93	1524.57	654.00		30.9					
	94	1525.00	189.00		28.3					
	95	1525.57	8.98		24.3					
	96	1526.14	22.70		22.2					
	97	1526.60	1.23		20.9					
	98	1527.10	2.15		20.2					
	99	1527.60	1.97		20.5					
	100	1528.10	8.75		25.3					
	101	1528.60	1.60		21.2					
	102	1529.10	20.90		20.4					
103	1529.60	22.00		21.7						
104	1531.08	5.40		24.2						

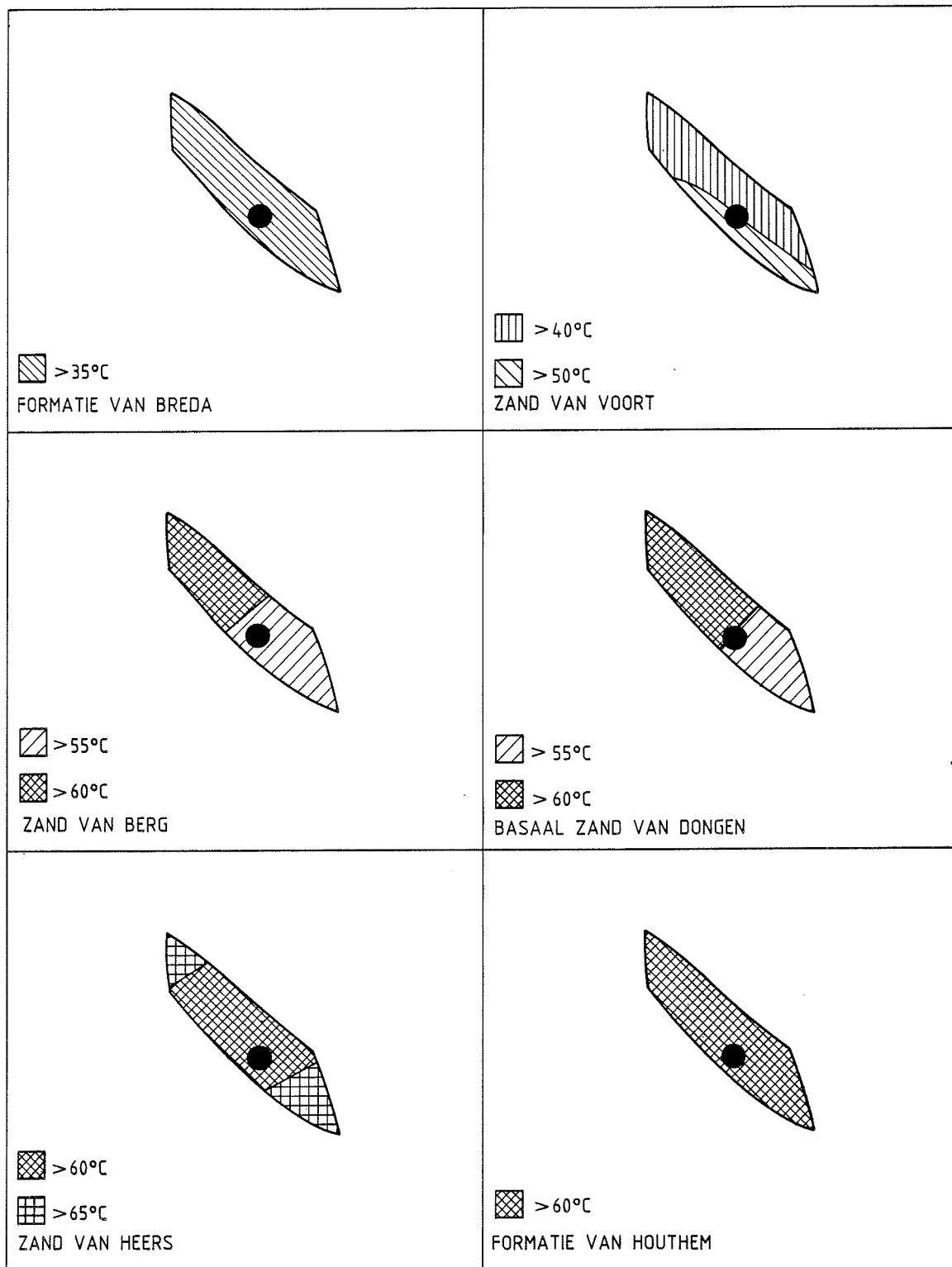
Tabel 5.1 vervolg

6. GEOTHERMISCHE RESERVES

6.1 Inleiding

Een belangrijk gegeven voor de ontwikkeling van geothermische energie in Nederland is dat Nederland geologisch gezien onderdeel is van een stabiel sedimentair bekken. Hoge warmtestromen, normaal geassocieerd met actieve vulkanische of orogene gebieden, komen hier niet voor. Het geothermisch potentieel van Nederland wordt gevormd door de terrestrische warmtestroom. Dit is de overdracht van warmte van hoge temperatuurgebieden in de aardkern - met een temperatuur van ca. 4000 graden - naar lage temperatuurgebieden zoals de aardkorst. De temperatuurgradiënt die hierbij ontstaat varieert per lokatie als gevolg van de verschillen in warmtegeleidingsvermogen van de lithologische eenheden die op die lokatie worden aangetroffen. In Nederland kunnen temperatuurgradiënten van 2 °C/100 m tot 4 °C/100 m worden aangetroffen.

Wanneer gesproken wordt over geothermisch potentieel dan moet onderscheid gemaakt worden tussen voorraden en reserves. Niet alle warmte die in de aardkorst aanwezig is kan ook worden gewonnen. Warmte moet worden getransporteerd naar de oppervlakte waar het kan worden toegepast. Het warmtetransport kan plaatsvinden door gebruik te maken van water of stoom dat van nature in gesteentelagen aanwezig is. Om transport mogelijk te maken zijn gesteentelagen nodig waardoor water of stoom kan stromen. Dit zijn voornamelijk zandsteen of gespleten kalksteenlagen. Warmtevoorraad zal hier worden gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die winbaar is. Dit houdt bijvoorbeeld in dat warmte aanwezig in kleilagen niet tot de warmtevoorraad wordt gerekend. Bij het transport van warmte naar de oppervlakte ondervindt het transportmedium (water of stoom) stromingsweerstand. Deze weerstand wordt o.a. bepaald door gesteente eigenschappen zoals de permeabiliteit. Hoe groter de weerstand, hoe groter de benodigde energie om het transportmedium rond te pompen. Hierdoor zijn niet alle winbare hoeveelheden warmte ook economisch winbaar. De economische winbaarheid wordt in belangrijke mate bepaald door de ontwikkeling van de energieprijzen. Warmtereserve zal hier worden gedefinieerd als de hoeveelheid warmte die technisch en economisch kan worden gewonnen.



Figuur 6.1 Temperatuurverdeling binnen het breukblok Asten voor verschillende formaties.

De boring Asten-2 ligt in de Centrale Slenk die wordt begrensd door de Peel-breuk in het noordoosten en de Feldbiss-breuk in het zuidwesten. De slenk wordt doorsneden door talloze secundaire breuken. Het breukblok waarin de boring zich bevindt is enige honderden meter gezakt ten opzichte van de oostelijk liggende Peelhorst. Hierdoor liggen veel formaties van Tertiaire ouderdom waarin stroming en warmtetransport mogelijk is op relatief grote diepte, hetgeen gunstig is voor de temperatuur ter plekke. In de boring Asten-2 zijn zandformaties onderzocht op hun potentie voor aardwarmtewinning. Slechts twee hiervan bevatten ook economisch winbare hoeveelheden warmte (zie conclusies hoofdstuk 4) en dragen daardoor bij aan de geothermische reserves.

De reservoir eigenschappen die met behulp van de metingen in de put zijn bepaald (zie hoofdstuk 4) kunnen van plaats tot plaats variëren. De produktiviteit van de formatie, die wordt bepaald door eigenschappen van het reservoir en de vloeistof die zich daarin bevindt, varieert derhalve ook. De in de put gemeten waarden gelden zeker niet voor de gehele Centrale Slenk maar zijn wel representatief voor het breukblok waarin de put zich bevindt.

6.2 Warmtevoorraad

6.2.1 Warmtevoorraad in het breukblok Asten

Het breukblok Asten heeft, afhankelijk van de diepte, een oppervlakte van 25 à 32 km². Voor de aquifers die voor winning in aanmerking komen is een temperatuurverdeling afgeleid die is weergegeven in figuur 6.1. In hoofdstuk 4 is reeds melding gemaakt van de gemeten temperaturen en temperatuurgradiënten (tabel 4.4 en figuur 4.10). Opvallend is de daling van de temperatuurgradiënt beneden het Zand van Berg. Het temperatuurverschil tussen het Zand van Berg en de Formatie van Houthem is slechts gering.

De warmtevoorraad wordt bepaald m.b.v. de volgende vergelijking:

$$H = \left(\phi \rho_w c_w + (1-\phi) \rho_m c_m \right) V \left(\theta_m - \theta_i \right) \text{ Joules} \quad , \quad (6.1)$$

waarin:

ϕ = porositeit

- r = soortelijk gewicht [g/m^3]
 c = warmtecapaciteit [$\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$]
 V = volume [m^3]
 θ = temperatuur [$^\circ\text{C}$]
 w = water
 m = gesteentematrix
 i = injectie

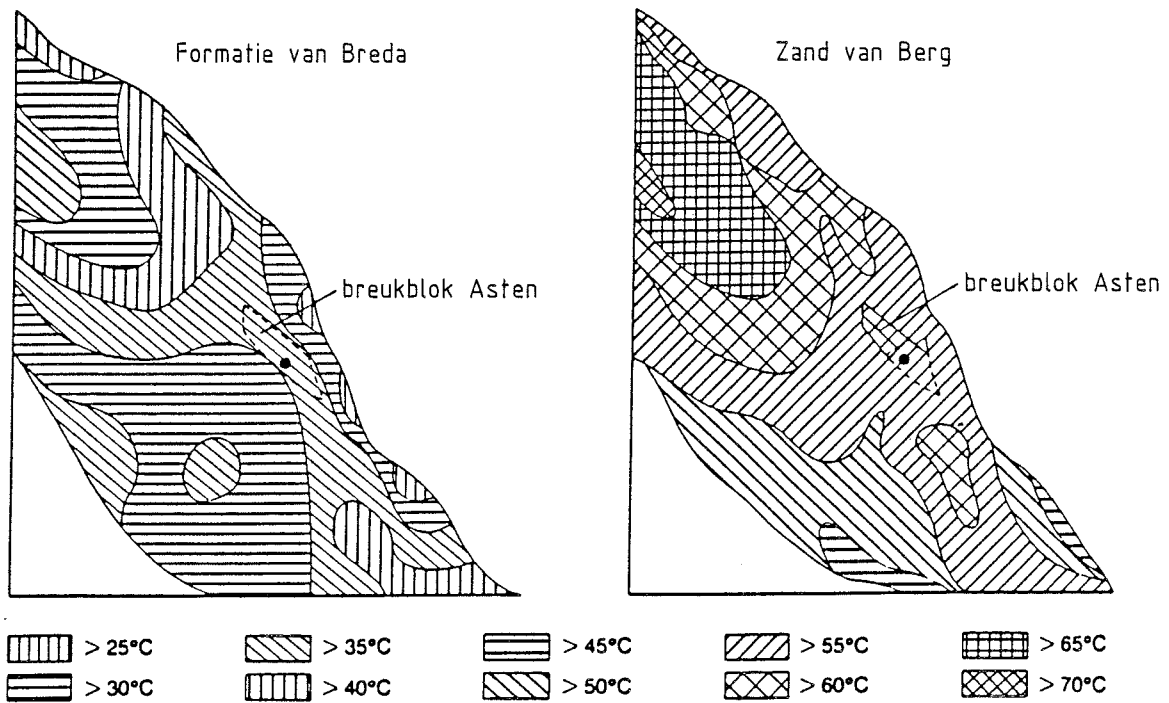
De gebruikte waarden bij de berekeningen zijn ontleend aan de reservoir evaluaties - hoofdstuk 4 en weergegeven in tabel 6.1.

Formatie	poro- siteit	dikte	tempe- ratuur	$\rho_w c_w$	$\rho_w c_m$	permea- biliteit	visco- siteit
	[-]	[m]	[$^\circ\text{C}$]	[$\text{J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]	[$\text{J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]	[mD]	[cp]
Formatie van Breda	0,40	59	35,5	$4,17 \cdot 10^6$	$1,653 \cdot 10^6$	820	0,75
Zand van Voort	0,32	219	49,2	$4,14 \cdot 10^6$	$1,707 \cdot 10^6$	7	0,64
Zand van Berg	0,35	19	59,5	$4,125 \cdot 10^6$	$1,746 \cdot 10^6$	370	0,51
Zand van Dongen	0,24	17	60,0	$4,125 \cdot 10^6$	$1,748 \cdot 10^6$	3	0,51
Zand van Heers	0,38	8	62,3	$4,12 \cdot 10^6$	$1,756 \cdot 10^6$	240	0,51
Formatie van Houthem	0,23	15	62,9	$4,12 \cdot 10^6$	$1,759 \cdot 10^6$	25	0,51

Tabel 6.1 Gemiddelde gesteente en vloeistofeigenschappen.

Het soortelijk gewicht en de warmtecapaciteit van water en gesteente zijn bepaald als functie van de temperatuur. De reinjectietemperatuur is afhankelijk van de toepassing van een warmtepomp. Wanneer de formatietemperatuur voldoende hoog is, zodat een warmtepomp overbodig is, dan bedraagt de injectietemperatuur 30°C . Bij toepassing van een warmtepomp wordt de injectietemperatuur verlaagd tot 17°C . (Vierhout, 1988a en 1988b).

De warmtevoorraad in het breukblok Asten bedraagt:



Figuur 6.2 Temperatuurverdeling binnen de Centrale Slenk voor de
Formatie van Breda en het Zand van Berg.

Formatie	<u>Geothermische reserves</u>	
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
Formatie van Breda	$27,0 \times 10^{15} \text{J}$	$90,7 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Voort	$368,5 \times 10^{15} \text{J}$	$615,6 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Berg	$40,2 \times 10^{15} \text{J}$	$57,7 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Dongen	$28,4 \times 10^{15} \text{J}$	$40,6 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Heers	$16,3 \times 10^{15} \text{J}$	$22,9 \times 10^{15} \text{J}$
Formatie van Houthem	$28,5 \times 10^{15} \text{J}$	$39,7 \times 10^{15} \text{J}$

Tabel 6.2 Warmtevoorraad in het breukblok Asten.

6.2.2 Warmtevoorraad in de Centrale Slenk

In de gehele Centrale Slenk liggen de Tertiaire formaties op grotere diepte dan in de directe omgeving. Vastgesteld kan worden dat de temperatuur in beide formaties afneemt van Noordwest naar Zuidoost (figuur 6.2). Dit is voornamelijk het gevolg van de afnemende diepte van de formaties in die richting en in mindere mate van de variaties in de geothermische gradiënt.

Minder zekerheid bestaat er over de hydraulische eigenschappen van de formaties buiten het breukblok Asten. De Centrale Slenk bevat slechts een gering aantal boringen, waarvan bovendien de gegevens vertrouwelijk zijn en derhalve niet toegankelijk. Voor het bepalen van de reserves van het gebied is het noodzakelijk te weten of we te maken hebben met een produktief reservoir of niet. Bij gebrek aan gegevens zal hier worden aangenomen dat de hydraulische eigenschappen van de twee potentieel geachte formaties - de Formatie van Breda en het Zand van Berg - continu zijn in de Centrale Slenk. Om het risico van deze aanname te kwantificeren zullen echter de reserves worden vermenigvuldigd met een risicofactor met een waarde van 0,25.

De berekende warmtevoorraad in de Centrale Slenk is daardoor een conservatieve schatting van de voorraden. De warmtevoorraad in de Centrale Slenk bedraagt $870 \times 10^{15} \text{J}$ zonder toepassing van een warmtepomp en $1789 \times 10^{15} \text{J}$ met toepassing van een warmtepomp.

6.3 Geothermische reserves

De winbare hoeveelheid warmte wordt gedefinieerd als de warmtevoorraad $H_0 \times F$, waarin F de winningsfactor voorstelt. De winningsfactor is gerelateerd aan het puttenpatroon waarmee de warmte wordt onttrokken. Voor een doublet systeem in het Franse Dogger aquifer is een waarde 0,33 gevonden. Bij afwezigheid van specifieke studies voor de Nederlandse situatie zal hier voor de winningsfactor voor een doublet een waarde van 0,25 worden gehanteerd. Voor een enkele put zou een winningsfactor van 0,10 gebruikt kunnen worden.

Zoals bij de formatie evaluatie (hoofdstuk 4) is vastgesteld, hebben niet alle formaties voldoende produktiviteit om economisch te kunnen produceren. Een produktieve zone binnen de Formatie van Breda (produktiviteitsindex: $13,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$) en het Zand van Berg (produktiviteitsindex: $2,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{bar}$) hebben dat wel. Indien wordt aangenomen dat de maximaal toelaatbare drukdaling in de put 20 bar is (de pompdiepte is dan 250 - 300 m) dan is de maximaal haalbare produktiesnelheid voor de Formatie van Breda $274 \text{ m}^3/\text{h}$ en voor het Zand van Berg $58 \text{ m}^3/\text{h}$. Toepassing van de hierboven genoemde uitgangspunten bij de berekening van de geothermische reserves in het breukblok Asten leidt tot het in tabel 6.3 weergegeven resultaat.

Formatie	<u>Geothermische reserves</u>	
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
Formatie van Breda	$6,8 \times 10^{15} \text{ J}$	$22,7 \times 10^{15} \text{ J}$
Zand van Berg	$10,1 \times 10^{15} \text{ J}$	$14,4 \times 10^{15} \text{ J}$
Totaal van het breukblok Asten	$16,9 \times 10^{15} \text{ J}$	$37,1 \times 10^{15} \text{ J}$
Uitgedr. in ton olie-equivalent*)	$390 \times 10^3 \text{ TOE}$	$850 \times 10^3 \text{ TOE}$
Uitgedrukt in aardgasequivalent*)	$525 \times 10^6 \text{ Nm}^3$	$1150 \times 10^6 \text{ Nm}^3$

*) Annex 6.1 Gebruikte energie conversie bij aardwarmte.

Tabel 6.3 Geothermische reserves in het breukblok Asten.

Wanneer dezelfde risicofactor om de extrapolatie van gegevens te kwantificeren wordt toegepast als in paragraaf 6.2.2 dan bedragen de reserves in de Centrale Slenk:

Formatie	<u>Geothermische reserves</u>	
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
Formatie van Breda	$109,5 \times 10^{15} \text{J}$	$288,5 \times 10^{15} \text{J}$
Zand van Berg	$107,8 \times 10^{15} \text{J}$	$158,8 \times 10^{15} \text{J}$
Totaal van het breukblok Asten	$217,3 \times 10^{15} \text{J}$	$447,3 \times 10^{15} \text{J}$
Uitgedrukt in ton olie-equivalent	$5 \times 10^6 \text{ TOE}$	$10,3 \times 10^6 \text{ TOE}$
Uitgedrukt in aardgasequivalent*)	$6,7 \times 10^9 \text{ Nm}^3$	$13,9 \times 10^9 \text{ Nm}^3$

*) Initiële schatting (1959) aardgasreserve gasveld Slochteren: $1650 \times 10^9 \text{ Nm}^3$.

Tabel 6.4 Geothermische reserves in de Centrale Slenk.

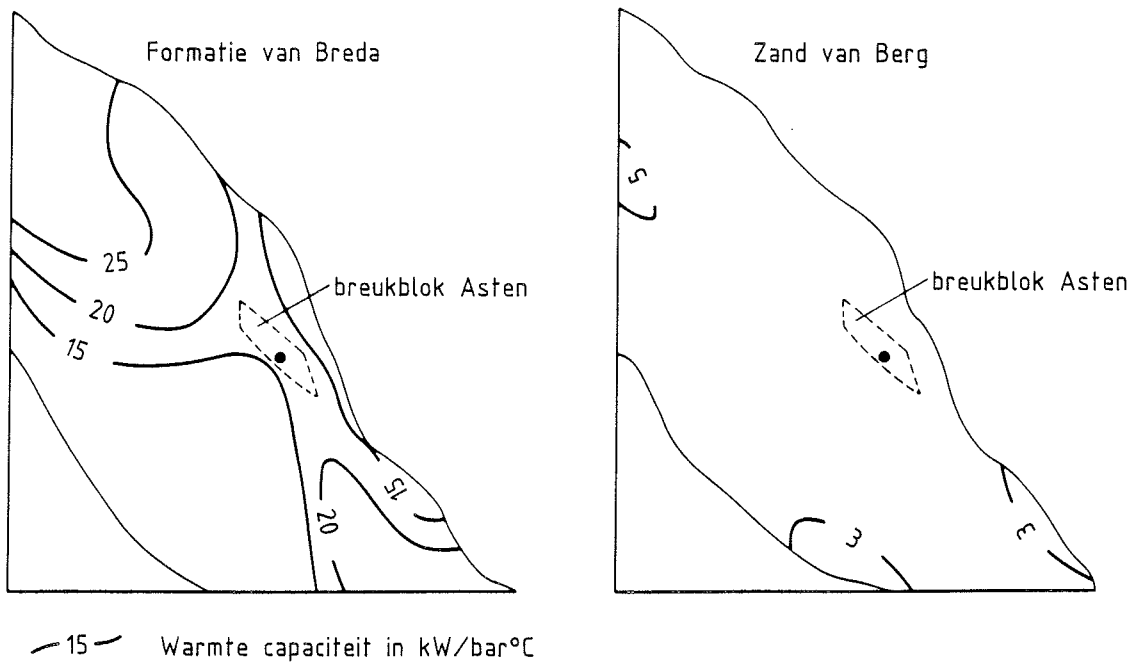
6.4 Warmtevermogen

Een nadeel van het presenteren van het geothermisch potentieel van een gebied als warmtevoorraad of als geothermische reserve is dat uit deze cijfers niet blijkt hoe eenvoudig, of met andere woorden tegen welke kosten deze reserves kunnen worden gewonnen. Een andere manier van presenteren, waarin de hydraulische eigenschappen van de formatie alsmede de temperatuursafhankelijke vloeistofeigenschappen zijn opgenomen, is het warmtevermogen, uitgedrukt in geleverd vermogen per eenheid temperatuurdaling en per eenheid drukdaling. Het warmtevermogen W is gedefinieerd als:

$$W = 2\pi \times 10^{-7} \frac{\rho_w c_w k h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad [W / \text{bar} \cdot ^\circ\text{C}] \quad , \quad (6.2)$$

- k = permeabiliteit [Darcy]
- h = formatiedikte [m]
- μ = viscositeit [cp]
- r_e = invloedstraal van het putsysteem [m]
- r_w = putstraal [m]

De invloedstraal van het putsysteem wordt geschat op circa 1000 m. Wanneer verder wordt aangenomen dat de put is afgewerkt met een 6" filterbuis kan, met de aangepaste formule voor stationaire stroming, op iedere gewenste plaats in de Centrale Slenk het warmtevermogen worden



Figuur 6.3 Warmtevermogenkaart van de Centrale Slenk voor de Formatie van Breda en het Zand van Berg.

berekend. Tevens is het mogelijk om een warmtevermogenkaart van het gebied voor een desbetreffende formatie samen te stellen. De warmtevermogenkaart voor de Formatie van Breda en voor het Zand van Berg is weergegeven in figuur 6.3.

Met de warmtevermogenkaart kan in combinatie met de informatie over de produktiviteit van de formatie en de temperatuurkaart voor iedere gewenste lokatie het thermisch vermogen van de produktieput van een geothermisch doublet worden bepaald. Het warmtevermogen van de twee potentiële formaties ter plaatse van Asten bedraagt:

	Warmtevermogen
Formatie van Breda	17,8 kW / bar °C
Zand van Berg	3,8 kW / bar °C

Wanneer de benodigde drukdaling Δp en het verschil tussen produktie en injectietemperatuur ΔT bekend zijn, kan het vermogen van een geothermisch doublet eenvoudig worden berekend, bijvoorbeeld:

	Zand van Berg	Formatie van Breda
	zonder warmtepomp	met warmtepomp
ontwerpdebiet	100 m ³ /h	200 m ³ /h
ΔP	34 bar	15 bar
Δt	29,5 °C	18,5 °C
thermisch vermogen	3,8 MW	4,9 MW

6.5 Toepassing van geothermische energie

Het onderzoek in Asten heeft aangetoond dat het Centrale-Slenkgebied aanzienlijke geothermische reserves herbergt. De mogelijkheden voor winning van aardwarmte zijn echter van meer factoren afhankelijk dan alleen de geologische condities en reservoir kenmerken. Het gaat niet alleen om de technische en economische haalbaarheid van een aardwarmte-project, maar ook dienen potentiële afnemers bereid te zijn om de warmte af te nemen in plaats van aardgas te gebruiken. Verder is een positieve instelling van de lokale en provinciale overheden, alsmede van de energiebedrijven een vereiste. Bij de keuze van de boorlokatie van de eerste geothermische proefboring in Nederland is destijds met deze niet-technische randvoorwaarden rekening gehouden (Haak et al., 1985).

Lage-enthalpie aardwarmte wordt om verscheidene redenen gewonnen met behulp van een zg. geothermisch doublet. Een doublet bestaat in principe uit twee putten, een injectie- en een produktieput. Het warme formatiewater wordt door een onderwaterpomp in de produktieput omhoog gepompt, via een warmtewisselaar geleid, waar het warmte afstaat aan een warmwatertransportleiding. Vervolgens wordt het inmiddels afgekoelde formatiewater door de injectieput in de oorspronkelijke formatie terug-geïnjecteed (figuur 1.1). De belangrijkste redenen voor toepassing van het doubletprincipe zijn handhaving van de druk in het reservoir en het zoutgehalte van het formatiewater (Dufour et al., 1983).

Afgezien van de levensduur van de technische voorzieningen wordt de levensduur van een project bepaald door de periode dat een geothermisch doublet de vereiste warmte kan blijven leveren. Dit is onder meer afhankelijk van het debiet (de opbrengst in $[m^3/h]$), van de afstand tussen het produktie- en injectiepunt in de aquifer, van de porositeit en van de reservoirdikte. Wanneer het debiet, de porositeit en dikte van het reservoir bekend zijn, kan bij een gevraagde levensduur de ondergrondse afstand tussen de twee putten van een geothermisch doublet worden berekend (Gringarten & Santy, 1975).

Op basis van de resultaten van de geothermische proefboring heeft Comrimo BV in opdracht van de Dienst Grondwaterverkenning TNO de toepassingsmogelijkheden onderzocht voor lage enthalpie geothermische energie in de Centrale Slenk. Voor verschillende gebruikerscategorieën is bij toepassing van geothermische energie per formatie de realiseerbare energiebesparing bepaald alsmede de bijbehorende energieprijzen die nodig is om aardwarmte economisch verantwoord toe te passen.

Met betrekking tot de toepassingsmogelijkheden van aardwarmtewinning zijn de volgende gebruikerscategorieën globaal onderzocht:

- glastuinbouw
- ziekenhuizen (300 bedden)
- meergezinswoningen (60 woningen)
- zwembaden
- thermale baden.

Bij alle warmte gebruikerscategorieën wordt er vanuit gegaan dat de aquifer als basislastvoorziening ingezet wordt en dat een ketel als pieklastvoorziening dienst doet.

Uit het onderzoek (Vierhout, 1989) is gebleken dat de kostprijs per warmte-eenheid (kWh) gevoelig is voor variatie van de volgende factoren:

- de investeringen in het geothermisch doublet;
- de equivalente vollasttijd per jaar van de aardwarmtebron;
- de capaciteit van de aardwarmtebron;
- de investeringen in een eventuele warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie;
- de onderhoud- en bedieningskosten; en
- de reële rente en aflossing van de investeringen.

Voor iedere warmtegebruikerscategorie geldt een specifieke jaarbelastingsduurcurve waarmee de equivalente vollasttijd kan worden bepaald. Hierbij zijn voor de verschillende gebruikerscategorieën twee opties doorgerekend, nl. de inzet van de aardwarmtebron als basislast eenheid zonder- en met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie. In beide gevallen dient de pieklast door een conventionele ketel geleverd te worden.

Aan de hand van het basislastvermogen, de equivalente vollasttijd en de verbrandingswaarde van aardgas zijn per aquifer voor de verschillende gebruikerscategorieën op jaarbasis de realiseerbare energie c.q. aardgasbesparingen bepaald. Uit deze berekening is naar voren gekomen dat de Formatie van Breda en het Zand van Berg mogelijk in aanmerking kunnen komen voor aardwarmtewinning. De formatiewater temperatuur van het Zand van Berg is voldoende hoog om te zorgen dat deze aquifer zonder extra voorzieningen dienst kan doen als aardwarmtebron. Echter, vanwege de geringe produktiviteit heeft de aardwarmtebron een relatief laag thermisch vermogen. Bij de Formatie van Breda is de temperatuur van het formatiewater laag en het formatiewaterdebiet hoog. Dit betekent dat er extra voorzieningen nodig zijn, zoals bijv. een warmtepomp.

Zonder de inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie blijkt de grootste netto aardgasbesparing ($1,2 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{jaar}$)

realiseerbaar bij winning van aardwarmte uit het Zand van Berg ten behoeve van de glastuinbouw. In geval van aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda is voor alle gebruikerscategorieën het energieverbruik van het doublet hoger dan de bruto energiebesparing, derhalve is er sprake van een negatieve netto energiebesparing. Met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie blijkt de netto energiebesparing bij aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda ten behoeve van de glastuinbouw en de woningbouw aanzienlijk, namelijk respectievelijk 6×10^6 en $4,5 \times 10^6$ Nm³/jaar.

De economische haalbaarheid van de toepassing van geothermische energie is afhankelijk van de investeringen, de energiebesparing en de energieprijsscenario's, onderhoud- en bedieningskosten en economische parameters te weten: reële rentevoet, terugverdiëntijd en economische levensduur. Met een "contante waarde"-berekening (Discounted Cash Flow - DCF methode) is, uitgaande van een terugverdiëntijd van respectievelijk 10 en 20 jaar, een reële rente van 4% en een project levensduur van 25 jaar, bij een geschatte investering van respectievelijk 7×10^3 kf (Zand van Berg zonder warmtepomp, 3 ha glastuinbouw) en 21×10^3 kf (Formatie van Breda met warmtepomp en warmtekrachtcombinatie, 20 ha glastuinbouw) de benodigde energieprijis - uitgedrukt in gulden per Nm³ aardgas equivalent - berekend.

Uit de economische evaluatie is gebleken dat onder de huidige omstandigheden aardwarmtewinning, uit de Formatie van Breda met inpassing van een warmtepomp en/of warmtekrachtcombinatie ten behoeve van de glastuinbouw, (minimum oppervlakte 20 ha), economisch haalbaar wordt bij een aardgasprijs van circa 35 - 60 cent per Nm³.

7. CONCLUSIES

De geothermische proefboring te Asten heeft een grote hoeveelheid relevante aardwetenschappelijke informatie opgeleverd omtrent de potentiële reservoirs die in het breukblok Asten en elders in de Centrale Slenk worden aangetroffen.

De lithostratigrafische opbouw van het Kenozoicum, zoals deze in de regio is beschreven, wordt in de boring Asten-2 grotendeels aangetroffen.

Op voorhand konden vier formaties worden geïdentificeerd die in aanmerking kwamen om op hun geschiktheid voor geothermische toepassing te worden onderzocht, namelijk de Formatie van Breda, het Zand van Voort, het Basaal Zand van Dongen en de Formatie van Houthem. Aan de hand van de resultaten van de proefboring kon in een later stadium het Zand van Berg, direct boven het Basaal Zand van Dongen, hieraan worden toegevoegd.

Uit poriënwater onderzoek aan sedimentmonsters blijkt dat er in de diepe ondergrond van Asten vanaf een diepte van 900 m een sterke toename plaatsvindt van het zoutgehalte van het formatiewater. Deze toename wordt vooral veroorzaakt door de - in geologisch opzicht - recente verdringing van oorspronkelijk brakke waters in de zandige lagen door formatiewaters waarvan de zoutgehalten hoger zijn dan die van zeewater.

Het formatiewater in het Zand van Berg bevat ca. 50 g/l opgeloste zouten.

Het water van de Formatie van Houthem en in het Zand van Berg is waarschijnlijk afkomstig uit een evaporiethoudend carbonaatgesteente. De werkelijk gemeten pH waarden voor het water in de Formatie van Houthem en in het Zand van Berg blijken beïnvloed te zijn door resten boorspoeling en zuurresten. De berekende pH waarde bedraagt voor de Formatie van Houthem 6,25 en voor het Zand van Berg 5,8.

Het formatiewater blijkt verzadigd met calcium. De gehalten aan kool-dioxide en andere CO₂-species zijn betrekkelijk laag. Het formatiewater zal bij onttrekking niet gaan 'koken'. Indien de leidingen vol met water worden gehouden en de totale druk minimaal 1 bar bedraagt, kan geen CO₂ ontwijken en zal er geen scaling van CaCO₃ optreden.

Scaling van CaCO₃ zal wel optreden als gevolg van het afnemen van de totaaldruk van 160 bar. Echter, indien tijdens de produktie van het water, behalve drukval, ook een (geringe) daling van de temperatuur optreedt, zal het water steeds onderverzadigd blijven aan calcium.

Op grond van de Duitse normen voor Heilwasser kan het formatiewater geclassificeerd worden als geneeskrachtig. Het geneeskrachtige water is van het type: (mogelijk ijzerhoudende) jodide- en fluoridehoudende thermale Sole van 5% sterkte.

De formatiekaracteristieken zijn met verschillende methoden geëvalueerd. Met de resultaten hiervan konden de porositeit en permeabiliteit van niet gemeten - of gekerde trajecten worden bepaald. Uit de correlatie van de gaspermeabiliteit (N₂) en vloeistof permeabiliteit gemeten aan kernen uit het Zand van Berg blijkt dat de permeabiliteit ongeveer halveert bij stroming van water.

Uit de produktietest op de Formatie van Houthem is gebleken dat de permeabiliteit van de Formatie van Houthem te laag is voor de winning van geothermische energie. Uit de produktietest op het Zand van Berg kon geen permeabiliteitswaarde worden afgeleid. Voor de bepaling van het geothermisch potentieel is de produktiviteitsindex gehanteerd welke op basis van de formatie evaluatie kan worden afgeleid $PI_{Berg} = 2.9 \text{ [m}^3/\text{hr]}/\text{bar}$.

De gemiddelde temperatuurgradiënt in het breukblok Asten bedraagt circa 3,2 °C/100 m. Op grotere diepten zijn de gemeten temperaturen aanmerkelijk hoger dan oorspronkelijk werd verwacht.

Op basis van de berekende produktiviteitsindices kan worden geconcludeerd dat voor winning van aardwarmte slechts twee formaties in aanmerking komen, nl. de Formatie van Breda met een produktiviteitsindex van $PI_{Breda} = 13,7 \text{ [m}^3/\text{hr]}/\text{bar}$ en een temperatuur van 35,5 °C en

het Zand van Berg met een $PI_{\text{Berg}} = 2,9 \text{ [m}^3/\text{hr]}/\text{bar}$ en een temperatuur van $59,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Voor de verschillende onderzochte formaties is de warmtevoorraad binnen het breukblok Asten en de Centrale Slenk berekend. De winbare hoeveelheid aardwarmte wordt medebepaald door de winningsfactoren. Wanneer een winningsfactor van 0,25 wordt toegepast, bedraagt de geothermische reserve in het breukblok Asten $16,9 \times 10^{15}\text{J}$ ($390 \times 10^3 \text{ TOE}^*$) zonder inpassing van een warmtepomp en $37,1 \times 10^{15}\text{J}$ ($850 \times 10^3 \text{ TOE}$) met warmtepomp. Bij de bepaling van de geothermische reserves in de Centrale Slenk is een risicofactor van 0,25 toegepast, de reserves in de Centrale Slenk bedragen $217,3 \times 10^{15}\text{J}$ zonder warmtepomp en $447,3 \times 10^{15}\text{J}$ met inpassing van een warmtepomp. Uitgedrukt in aardgasequivalent is de geothermische reserve in de Centrale Slenk vergelijkbaar met circa 1% van de initiële schatting (1959) van de aardgasreserves van het Slochteren gasveld.

Voor een aantal gebruikerscategorieën is aan de hand van de realiseerbare energie c.q. aardgasbesparing per categorie de toepasingsmogelijkheden voor aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda en het Zand van Berg bepaald. Hieruit kon worden afgeleid dat aardwarmtewinning ten behoeve van de glastuinbouw en de woningbouw (meer gezinswoningen) kan resulteren in aanzienlijke netto energiebesparingen. Uit de economische evaluatie is gebleken dat onder de huidige omstandigheden aardwarmtewinning uit de Formatie van Breda ten behoeve van de glastuinbouw pas economisch haalbaar wordt bij een aardgasprijs van circa 40-60 cent per Nm^3 .

De resultaten van de proefboring zijn - zeker geologisch gezien - van meer dan regionale betekenis en beperken zich derhalve niet tot de Centrale Slenk en of de geothermie. Echter voor een betrouwbare bepaling van de geothermische reserve elders in Nederland of in andere geologische formaties zullen proefboringen zoals in Asten, onontbeerlijk zijn. Wel is het eventueel mogelijk om met behulp van moderne geofysische technieken de geologische prognose met betrekking tot diepte, dikte en uitgestrektheid van potentiële formaties te verifiëren.

* TOE = Ton olie equivalent.

8. REFERENTIES

- Balke, K.D., 1974. Beitrag zur Grundwasserchemie in der südlichen Niederrheinischen Bucht. Fortschr. Geol. Rheinld.u.Westf., 20: pp. 307-354.
- Ball, J.W., D.K. Nordstrom and E.A. Jenne, 1980. Additional and revised thermodynamical data and computer code for WATEQ2 - a computerized chemical model for trace and major element speciation and mineral equilibria of natural waters. U.S. Geol. Surv., WRI 78-116: pp. 1-109.
- Begriffsbestimmungen für Kurorte, Erholungsorte und Heilbrunnen vom Juni 1979. Herausgegeben vom Deutschen Bäderverband e.V. und vom Deutschen Fremdenverkehrsverband e.V.
- Brauning, E., 1979. Statistische Auswertung von Haupt- und Spurenelementen in Mineral- und Thermalwasseranalysen der Bundesrepublik Deutschland. Kernforschungsanlage Jülich. Jül-Spez-60.
- Carle, W., 1975. Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa, Geologie, Chemismus, Genese, Wissensch. Verl. Ges. M.B.H. Stuttgart.
- Coenegracht, Y.M.A. en B.W. Zuurdeeg, 1986. Geochemische aspecten van adiabatische persluchttopslag, Intern Rapport Rijksuniversiteit Utrecht.
- Collins, A.G., 1975. Geochemistry of oilfield brines. Developments in Petroleum Science, 1. Elsevier publ. C., Amsterdam: pp. 1-496.
- Comprimo B.V., 1986. Toepassing van ondiepe aardwarmte (max. 80 °C) in de glastuinbouw en de industrie, i.o.v. NOVEM (voorheen PEO).

Deerns, raadgevende ingenieurs B.V, 1986. Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van ondiepe aardwarmte voor de gebruikerscategorieën landbouw, viskwekerijen, gezondheidszorg en zwembaden, i.o.v. NOVEM (voorheen PEO).

Dickson, A.G. and M. Whitfield, 1981. An ion-association model for estimating acidity constants (at 25 °C and 1 atm. total pressure) in electrolyte mixtures related to seawater (ionic strength < 1 mol/kg H₂O). Mar. Chem. 10: pp. 315-333.

Doorn, Th.H.M. van, C.I. Leyzers Vis, N. Salomons, W. van Dalfsen, H. Speelman, en W. Zijl, 1985. Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen. RGD, Haarlem, rapportnr. 85 KAR 02EX.

Dufour, F.C. en R.M. Vierhout, 1983. Voorbereiding evaluatieboring aardwarmte demonstratieproject Delfland, 3 delen. Rapport nr. OS 83-29, Dienst Grondwaterverkenning TNO.

Gaans, P.F.M. van, 1989. WATEQX-A restructured, generalized and extended Fortran 77 computer code and database format for the WATEQ aqueous chemical model for element speciation and mineral saturation, for use on personal computers or mainframes. Computers & Geosciences, in press.

Garrels, R.M. and C.L. Christ, 1965. Solutions, minerals and equilibria. Harper and Row, New York: pp. 1-450.

Goblet, P., 1980. Influence of stratified heterogeneities of permeability on the lifespan of a geothermal doublet, Advances in European Geothermal Research, Second International Seminar, 4-6 March, 1980, Strassbourg.

Gringarten, A.C. and J.P. Sauty, 1975. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow, Journal of Geophysical Research, vol. 80, no. 35.

- Gringarten, A.C., 1984. Interpretation of tests in fissured and multilayered reservoirs with double-porosity behaviour: Theory and practice, *Journal of Petroleum Technology*, April 1984.
- Haak, A.M., J.P. Heederik en R.M. Vierhout, 1985. Vooronderzoek Geothermisch proefproject Asten. Rapport nr. OS 85-36, Dienst Grondwaterverkenning TNO.
- Heidemij Adviesbureau, Bredero Energy Systems, 1986. Toepassing van ondiepe aardwarmte in de woningbouw, i.o.v. NOVEM (voorheen PEO).
- Helander, D.N., 1983. Fundamentals of Formation Evaluation, Oil and Gas Consultants International.
- Keizer, J. en Letsch, W.J., 1963. Geology of the Tertiary in the Netherlands. KNGMG deel 21/2: p. 147-172.
- Kimpe, W.F.M., 1976. Hydrogeologische en hydrochemische aspecten van het water in de vaste gesteenten van het Krijt, Trias en Carboon in Limburg en omgeving. Sticht. Postacadem. Vorming; Gezondheidstechniek.
- Klostermann, J., 1983. Die Geologie der Venloer Scholle (Niederrhein). *Geol. Jahrb., Reihe A, Heft 66, Hannover*.
- Macdonald, R.W. and N.A. North, 1974. The effect of pressure on the solubility of CaCO_3 , CaF_2 and SrSO_4 in water. *Can. J. Chem.* 52: pp. 3181-3186.
- Marie, P., 1947. Sur l'age montien du Calcaire de Bunde (Limbourg hollandais). *C.R. Somm. Soc. geol. Fr.*, 21 avril 1947, no. 7.
- Meenan, D.N. 1980. Estimating water viscosity at reservoir conditions, *Petroleum Engineer International*, July 1980.

Michel, G., 1963. Untersuchungen über die Tiefenlage der Grenze Süßwasser-Salzwasser im nordlichen Rheinland. Forschungsber. des Landes Nordrhein-Westfalen. Westdeutscher Verlag. Köln und Opladen.

Millero, F.J. and D.R. Schreiber, 1982. Use of the ion pairing model to estimate activity coefficients of natural waters. Am. J. Sci. 282: pp. 1508-1540.

Muis, H., R. Wilting en J.P. Heederik, 1986. Potentieel Asten-achtigste Aardwarmteprojecten Onderzoekbureau Energie Anders en Dienst Grondwaterverkenning TNO.

NAM & RGD, 1980. Stratigraphical Nomenclature of the Netherlands. KNGMG deel 32.

Parkhurst, D.L., D.C. Thorstenson and L.N. Plummer, 1980. PHREEQE-A computer program for geochemical calculations. U.S. Geol. Surv. WRI 80-96: pp. 1-210.

Postma, A.D. en H. Muis, 1987. Ondiepe Aardwarmte (AWO). Een parametrische studie naar kosten en mogelijkheden, i.o.v. Ministerie van VROM en NOVEM (voorheen PEO), Onderzoekbureau Energie Anders.

Redwood Corex, 1987. Conventional core analysis study for TNO-DGV, . Institute of Applied Geoscience, Well no.: Asten-2. Redwood Corex Petrophysical Sciences, Aberdeen, England.

RGD, 1982. Geologische inventarisatie van tertiaire afzettingen in Zuid-Nederland t.b.v. ondergrondse opslag en winning van warm water. Rapportnummer 82DS22.

Schoute, H.R., 1982. Hydrogeologische inventarisatie van Tertiaire aquifers in Zuid-Nederland t.b.v. de ondergrondse opslag van warm water. Dienst Grondwaterverkenning TNO, rapport OS 82-25.

- Speelman, H. en J.J. Breunese, 1985. Permeabiliteit, porositeit en kleigehalte van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Nederland, RGD, rapport nr. 84 KAR 13 EX.
- Suau, J. and J. Gartner. Fracture detection from the logs, Schlumberger document, undated.
- Truesdell, A.H. and B.F. Jones, 1974. WATEQ: a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. J. Res. U.S. Geol. Surv. 2: pp. 233-248.
- Vierhout, R.M., 1987. Bovengrondse installaties ten behoeve van het geothermisch doublet te Asten. Comprimo B.V. (voorlopig eindrapport t.b.v. de exploratieboring).
- Voigt, H.J., 1977. Zur Geochemie der Spurenelemente Brom, Jod, Bor, Strontium und Lithium in den Mineralwassers des Nordteils der DDR. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 23, Heft 8: pp. 395-402.
- Weiden, M.J.M. v.d., 1984. Saliniteitscurve boring Kemperkoul a.d.h.v. boorkernextracten, studentenscriptie.
- Zuurdeeg, B.W. and M.J.J. v.d. Weiden, 1985. Geochemical aspects of European bottled waters. In: Geothermics, Thermal-Mineral Waters & Hydrogeology. Theophrastus Publ., Athens: pp. 235-264.
- Zuurdeeg, B.W., Y.M.A. Coenegracht en P.F.M. van Gaans, 1989. Geothermische reserves Centrale Slenk Nederland - Geothermische aspecten van het formatiewater, Dienst Grondwaterverkenning TNO en Rijksuniversiteit Utrecht.

Annex 1.1 Gedetailleerd overzicht van de boor- en meetwerkzaamheden
 in verband met de uitvoering van de proefboring te Asten

Overzicht van de boorwerkzaamheden per kalenderdag tussen 0 en 24 uur

Voor de aanvang van de boring werd tussen 22 en 27 oktober 1986 een
 stovepijp door middel van een puls boring in de grond gebracht. Diameter
 van de buis 20", diepte van de verbuizing 26,66 m-mv.

		Voortgang
23-11-'86	Aanvang boring 15.00 uur; Boordiameter 17 1/2" tot 76 m diepte.	49,34 m
24-11-'86	Boordiameter 17 1/2" tot 170 m diepte.	94 m
25-11-'86	Boordiameter 17 1/2" tot 408 m diepte.	238 m
26-11-'86	Boordiameter 17 1/2" tot 466 m diepte. Boorgatmetingen door DGV; Deviatie meting; Voorbereidingen voor verbuizing; Begonnen met de verbuizing van 13 3/8" casing.	58 m 0 m
27-11-'86	Inbouwen van de 13 3/8" casing tot 457,86 m diepte, Cementatie van de 13 3/8" casing.	0 m
28-11-'86	Verharden van cement; Levering van BOP en begonnen met montage van BOP.	0 m
29-11-'86	Montage van BOP, testen van BOP.	0 m
30-11-'86	Storing aan de mast; boren onderbroken tot 04-01-'87. Controle en reparatie BOP: Vervanging van de mast	0 m
05-01-'87	Opstellen, spoeling mixen: Testen van de mast met 80 t belasting.	0 m

		Voortgang
06-01-'87	Leidingen aansluiten, testen van BOP en inbouwen van zwaarstangen.	0 m
07-01-'87	Uitboren van cement; Boordiameter 12" tot 470,14 m diepte.	4,14 m
08-01-'87	Boordiameter 12" tot 706 m diepte; Deviatie meting.	235,86 m
09-01-'87	Boordiameter 12" tot 903,4 m diepte.	197,40 m
10-01-'87	Strengte vorst - uitbouwen en demontage pompen en leidingen ontdooien. Deviatie meting; Inbouwen, circulatie, en uitbouwen tot in de casingshoe	0 m
11-01-'87	Strengte vorst - ontdooien: demontage en na ontdooien montage van de standpijp en de kelly-slang	0 m
12-01-'87	Ontdooien van luchtleidingen: Kernen tussen 903,4 m en 912,4 m diepte, Kernboordiameter 8 $\frac{3}{8}$ "	9,0 m
13-01-'87	Ontdooien van pompleidingen; Boordiameter 12" tot 1012 m diepte; Deviatie meting.	99,6 m
14-01-'87	Uitbouwen en boorgatmetingen uitgevoerd door Welex en DGV	0 m
15-01-'87	Vorbereiding voor het inbouwen van 9 $\frac{5}{8}$ " casing. Aggregaat van Weatherford kon niet starten vanwege vorst; levering ander aggregaat.	0 m
16-01-'87	Inbouwen van 9 $\frac{5}{8}$ " casing.	0 m

		Voortgang
17-01-'87	Cementeren 9 5/8" casing Verharding cement.	0 m
18-01-'87 tot 21-01-'87	Boren stopgezet voor controle en reparatie boormachine.	0 m
22-01-'87	Spoeling mixen en reparatie spoelkop; Inbouwen zwaarstangen.	0 m
23-01-'87	Inbouwen en uitboren cement; Boordiameter 8 1/2" tot 1044 m diepte.	32 m
24-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1109,0 m diepte.	65 m
25-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1135 m diepte; Deviatie meting	26 m
26-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1144 m diepte; Reparatie v.d. pomp en de koppeling van de lier; Moelijkheden bij uitbouwen, zwellende klei.	9 m
27-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1191 m diepte; Vervanging schudzeef en testen "kill line".	47 m
28-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1229 m Deviatie meting; Uitbouwen en Controle boormachine, aanpassen van de pomp voor kernen Kernen 1229 m - 1238 m; Kernboordiameter 8 3/8".	38 m 9 m
29-01-'87	Uitbouwen, kernbuis leeg maken; Inbouwen, kernen 1238 m - 1247 m, Kernboordiameter 8 3/8".	9 m
30-01-'87	Test "Pit Drill" en BOP; Boordiameter 8 1/2" tot 1400 m diepte	153 m

		Voortgang
31-01-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1438 m diepte; Ontdooien, reparatie kruiskoppeling en pomp.	38 m
01-02-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1466 diepte; Deviatie meting; Uitbouwen.	28 m
02-02-'87	Inbouwen, kernen 1466 m tot 1474 m, Kernboordiameter 8 3/8".	8 m
03-02-'87	Kernbuis leegmaken; Kernen 1474 m - 1483 m, Kernboordiameter 8 3/8".	8,14 m
04-02-'87	Kernen 1483 m - 1492 m, Kernboordiameter 8 3/8".	9,0 m
05-02-'87	Boren 1492 m - 1492,5 m; Kernen 1492,5 m - 1501,5 m Kernboordiameter 8 3/8".	0,5 m 9,0 m
06-02-'87	Reparatie pomp; Boren 1501,5 m - 1502,5 m; Kernen 1502,5 m - 1512 m, Kernboordiameter 8 3/8".	1,0 m 9,5 m
07-02-'87	Boren 1512 m - 1512,5 m; Kernen 1512,5 m - 1521,5 m; Boren 1521,5 m 1522 m: Kernen 1522 m - 1531,0 m, Kernboordiameter 8 3/8".	0,5 m 9,0 m 0,5 m 9,0 m
08-02-'87	Boren 1531 m - 1532 m; Kernen 1532 m - 1536,7 m, Kernboordiameter 8 3/8". Inbouwen rollerbeitel 8 1/2 diameter.	1 m 4,7 m

		Voortgang
09-02-'87	Ruimen boorgat na kernen, Boordiameter 8 1/2" tot 1593 m diepte.	56,3 m
10-02-'87	Boordiameter 8 1/2" tot 1636,6 m diepte; Deviatie meting; Uitbouwen.	43,36 m
11-02-'87	Boorgatmeting Welex.	0 m
12-02-'87	Vorbereidingen voor inbouwen 7" casing; Check Trip.	0 m
13-02-'87	Inbouwen van de 7" casing tot 1636 m diepte; Cementeren.	0 m
14-02-'87	BOP aangepast op DP 3 1/2" en testen BOP, Verharden cement.	0 m
15-02-'87	Inbouwen en spoeling mixen.	0 m
16-02-'87	Uitboren cement, Boordiameter 6" tot 1673 m diepte; Uitbouwen.	36,64 m
17-02-'87	Boorlogmetingen Welex inclusief Cement Bond Log (CBL); Meetsonde kon niet onder casing komen; inbouwen, ruimen en uitbouwen; Meetsonde kon opnieuw niet worden ingevoerd.	0 m
18-02-'87	Inbouwen, ruimen en wachten; Terugbouwen, circuleren en uitbouwen; Meetsonde kon opnieuw niet worden ingevoerd.	0 m
19-02-'87	Inbouwen en circuleren; Cementplug gezet en verharden cement.	0 m

		Voortgang
20-02-'87	Uitboren cementplug; Boring schoongespoeld tot 1673 m diepte; Uitbouwen en voorbereidingen voor pompproef.	0 m
21-02-'87	Inbouwen filterbuis (geperforeerde buis); Klaarmaken voor pompproef.	0 m
22-02-'87	Pompproef met airlift uitgevoerd; Metingen van Flopetrol; Verzanden van boring.	0 m
23-02-'87	Ombouwen voor spoelen, schudzeef vervangen en inbouwen.	0 m
24-02-'87	Spoeling mixen; Zand uitspoelen en iittrekken filterbuis door Red Baron.	0 m
25-02-'87	Schoonspoelen van de boring tot 1673 m diepte; Boorgatmetingen uitgevoerd door Welex.	0 m
26-02-'87	Boorgatmetingen uitgevoerd door Welex; Onderhoud boormachine en opruimen boorlokatie.	0 m
27-02-'87	Opruimen boorlokatie en onderhoud boortoren.	0 m
28-02-'87	Inbouwen van de wire wrapped filterbuis; Zurenbehandeling van de boring.	0 m
<p>Figuur A-1.1.1 toont de uiteindelijke putafwerking in de Formatie van Houthem.</p>		
01-03-'87	Montage airlift systeem, Pompproef; produktie formatie gering, beëindiging pompproef en uitbouwen.	
02-03-'87	Terugwinning casing: Afsnijden 7" casing op 809,75 m diepte en uitbouwen 7" casing.	0 m

		Voortgang
03-03-'87	Afbouwen BOP; Afsnijden 9 5/8" casing op 330,49 m diepte.	0 m
04-03-'87	Uittrekken van 9 5/8" casing.	0 m

Tijdanalyse

van de totale tijd van 1490 uren
 tussen 30-11-'86 en 04-01-'87
 verdeeld in 20 operaties

	Fase 20"	Fase 17 ¹ / ₂ "	Fase 12"	Fase 8 ¹ / ₂ "	Fase 6"	Totaal	%
1. Boren	18.00	47.00	54.30	114.45	8.30	242.45	16,3
2. Kernen			4.00	73.30		77.30	5,2
3. Werkzaamheden v.h. boren		9.45	86.30	212.15	114.15	422.45	28,3
4. Opboren			5.30	12.45	3.30	21.45	1,5
5. Loggen		4.45	19.30	24.00	42.15	90.30	6,1
6. Spoeling-mixen en circulatie		12.00	21.00	20.00	42.15	101.15	6,8
7. Casing	6.00	18.15		12.15		36.30	2,5
8. Cementatie		6.15	6.00	1.30	5.30	19.15	1,3
9. Pompproef					20.30	20.30	1,4
10. Verharding cement		10.00	16.00	11.30		37.30	2,5
11. Liner 1					13.45	13.45	0,9
12. Liner 2					17.00	17.00	1,1
13. Zuurbehandeling					3.30	3.30	0,3
14. Casing uitbouwen					52.30	52.30	3,5
15. Deviatie metingen		0.30	2.30	1.45		4.45	0,3
16. Montage BOP/Testen/Demon.		34.45	11.00		32.00	77.45	5,2
17. Fishing / Instrumentatie					24.00	24.00	1,6
18. Reparatie / ontdooien		13.45	10.00	57.15	17.45	98.45	6,6
19. Diverse / laden-lossen		6.30	58.00		8.45	75.15	4,9
20. Wachtijd		4.45	11.15	2.30	36.00	54.30	3,7
	24.00	168.15	305.45	544.00	448.00	1490.00	100

Totaal 1490 boormachine-uren

Kernen

Het kernen van alle trajecten werd in aanwezigheid van de specialist(en) van de firma Diamant Boart uitgevoerd. Als gereedschap werd gebruikt een kernbuis $6 \frac{3}{4}'' \times 4''$ lengte 9 m met een binnenbuis vervaardigd uit fiberglas. De keuze van dit type kernbuis werd gedaan op grond van goede ervaringen met kernen in de olieboringen. Voor de eerste kernoperatie werd een diamantboorkroon type CT 303 gebruikt. Aangezien de kernopbrengst van het eerste traject niet optimaal was, werd voor de komende trajecten een andere boorkroon type CD-502 Diapax gebruikt. Het winnen van kernen werd bemoeilijkt door de sterk wisselende kwaliteit van aangeboorde lagen met name taaie kleilagen afgewisseld met losse zandformaties. Om een goede kernopbrengst te bereiken werd een lengte van de kernbuis van slechts 9 m gekozen en werd het kernen als boorproces continue gevolgd door de specialist van Diamant Boart.

Er werd geen speciale boorspoeling voor het kernen gebruikt. De boorsnelheid tijdens het kernen varieerde sterk met de kwaliteit van de grond tussen 5 min. en meer dan 105 min. per meter kernboren.

Normaal werd geboord met een WB (weight of bit = gewicht op de beitel) van ± 5 ton. De maximale druk op de kernkroon was 9 ton. Om de kernen speciaal in losse zandformaties niet uit te spoelen werd er met een zo laag mogelijke ingepompte hoeveelheid boorspoeling gewerkt die tussen 200 lpm en 450 lpm lag met een piek van 1100 lpm. Het aantal omwentelingen van de boorkroon lag tussen 80 en 125 per min. Overwegend werd geboord met ± 100 omw./min.

Gekernde tracees en kernopbrengst

Kerntraject	Diepte	te kernen	kernlengte	kernopbrengst
<u>no</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>%</u>
1	903,4 - 912,4	9,00	2,78	30,89
2	1229,0 - 1247,0	18,00	15,39	85,50
3	1466,0 - 1536,7	67,20	60,12	89,50
Totaal		94,20	78,29	83,11

Kernopbrengst per kernbuis lengte 9 m

Kernbuis	Diepte	te kernen	kernlengte	kernopbrengst
<u>no</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>m</u>	<u>%</u>
1	903,4 - 912,4	9,0	2,78	30,89
2	1229,0 - 1238,0	9,0	5,99	66,56
3	1238,0 - 1247,0	9,0	9,40	104,44
4	1466,0 - 1474,0	8,0	6,47	80,88
5	1474,0 - 1483,0	9,0	9,42	104,67
6	1483,0 - 1492,0	9,0	8,79	97,67
7	1492,5 - 1501,5	9,0	4,75	52,78
8	1502,5 - 1512,0	9,5	9,45	99,47
9	1512,5 - 1521,5	9,0	9,12	101,33
10	1522,0 - 1531,0	9,0	7,85	87,22
11	1532,0 - 1536,7	4,7	4,27	90,85
Totaal		94,2	78,29	83,11

Behandeling van de krijtformatie met zuren

Om de spoelingresten te verwijderen en de doorlatendheid van de krijtlaag te vergroten werd de watervoerende laag behandeld met een zuuroplossing. De eerste behandeling werd uitgevoerd vóór het definitieve plaatsen van de liner met de filterbuis. Voor het "zuren" werd een 15% oplossing zoutzuur in water gebruikt.

Aan de zoutzuuroplossing werden de inhibitor HAI75 en de surfactant HC₂ toegevoegd in een oplossing van 3 l per 1000 l. De behandeling gebeurde in twee fasen. In de eerste fase werden 1500 l HCl oplossing ingepompt met een druk van 10 bar en met een capaciteit van 60-70 l/min.

In de tweede fase werden 1500 l HCl oplossing ingepompt met een druk van 15 bar en met een capaciteit van 140 l/min.

Het zuren werd tijdens het plaatsen van de liner in een operatie uitgevoerd. De liner werd met vier messing bouten aan de boorpijp bevestigd. Onder de boorpijpen waarop de liner bevestigd werd bevond zich een wash pijp met een diameter van 1¹/₄" en 48 m lang. Deze constructie als geheel werd in de boring neergelaten en in de eerste fase niet tot op de bodem van de boring geplaatst. De zuuroplossing stroomde aan de buitenkant van de liner in de formatie. In de tweede fase werd de liner op de bodem geplaatst waarna de zuurbehandeling door de filterbuis plaatsvond. Daarna werden de messing bouten door het gewicht van de boorpijpen afgeknipt, de boring schoongespoeld en de boorpijp met de wash-pijp uitgebouwd.

Boorspoeling

Bij de keuze van de samenstelling van de boorspoeling werd met de onderstaande criteria in rekening gehouden:

- De boorspoeling mag niet de doorboorde geologische formaties beschadigen;
- De spoeling moet regenererbaar zijn en na de regeneratie in een maximale hoeveelheid bruikbaar zijn voor het boren;
- De spoeling mag geen grote problemen bij de liquidatie veroorzaken;
- Zo veel mogelijk water moet opnieuw bruikbaar zijn voor het boorproces;
- De regeneratie van de boorspoeling moet op een eenvoudige wijze gebeuren.

De voorstellen voor de samenstelling van te gebruiken boorspoeling werden door de firma Tri Corp gedaan. Deze firma heeft ook de grondstoffen geleverd. Voor het opstarten van verschillende boorfases en voor het uitvoeren van speciale werkzaamheden is een specialist van de bovengenoemde firma op de boorlocatie aanwezig. Gedurende het boren werd de spoeling door de boorfirma gecontroleerd.

Voor enkele boorfases werden de volgende boorspoelingen gebruikt:

1. Fase 20" werd gerealiseerd met de doorlopende verbuizing tijdens boren. Het verbuizen van de boring werd door middel van een verbuizingsinstallatie uitgevoerd. In dit geval was geen spoeling nodig.

2. Fase 17 1/2" boorgat

Voor het boren van deze fase werd een boorspoeling op bentoniet basis gebruikt. De inhoud van bentoniet in zoetwater was betrekkelijk laag om een cake van een voldoende dikte te bereiken. Deze beschermt het uitwassen van de niet of weinig geconsolideerde zandlagen en heeft een goede draagcapaciteit.

Samenstelling van de boorspoeling

Bentoniet/Bengel	50 kg/m ³
Caustic Soda	2 kg/m ³

Technische parameters / gemiddelde gegevens

SG (soortelijk gewicht)	1,03 - 1,06 kg/l
Marsh viscositeit	48 s/qt - 53 s/qt
Ph	9,5
Waterverlies	niet van toepassing

Ondanks de goede parameters van de spoeling begonnen tijdens het boren de zeer losse zandlagen voornamelijk onder de stovepijp uit te spoelen. De spoeling werd aangepast met het toevoegen van meer bentoniet in combinatie met CMC.

Gemeten SG 1,06 kg/l

Fase 12" boorgat

Voor deze boorfase werd gekozen voor een Bentoniet-Polymer boerspoeling. Bij deze spoeling werd ook het waterverlies gecontroleerd.

Samenstelling van de boerspoeling

Bentoniet/Bengel	28,5 kg/m ³
Super Hi Vis	5,0 kg/m ³
Caustic Soda	2,0 kg/m ³

Technische parameters / gemiddelde gegevens

SG (soortelijk gewicht)	1,03 - 1,07 kg/l
Marsh viscositeit	42 s/qt - 55 s/qt
Ph	9 - 10
Waterverlies	7 - 9 cm ³ / 30 min.
Yield point	9 - 12 lbs / 100 ft ²

Deze spoeling biedt een goede bescherming tegen het zwellen van kleien. De hoge viscositeit is bereikt met weinig spoelingsmaterialen en heeft een goede transportcapaciteit bij een laag waterverlies. Verder biedt deze spoeling een grote weerstand tegen cement of zout.

De beste resultaten met mixen worden bereikt in deze volgorde

1. Water + bentoniet
2. Caustic soda
3. Super Hi Vis
4. Namixen in de mixtank gedurende ± 2 uur

Fase 8 1/2" boordiameter

Deze fase werd geboord in principe met dezelfde spoeling als de fase 12" boordiameter. Belangrijk is de controle op waterverlies en het handhaven van deze waarde op $\pm 5 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$.

Voor het reduceren en handhaven van het waterverlies kan Poly Low toegevoegd worden.

Samenstelling van de boorspoeling

Bentoniet/Bengel	28,5 kg/m ³
Super Hi Vis	5,0 kg/m ³
Caustic Soda	2,0 kg/m ³
Poly Low	tot 10 kg/m ³

Technische parameters / gemiddelde gegevens

SG (soortelijk gewicht)	1,07 - 1,12 kg/l
Marsh viscositeit	45 s/qt - 66 s/qt
Ph	8 - 10
Waterverlies	4 - 5,5
Yield point	10 - 18 lbs / 100 ft ²

Fase 6" diameter

Werd geboord met dezelfde spoeling als de fase 8 1/2".

Het gebruik van Poly Low kan weer tot 10 kg/m³ oplopen om het waterverlies laag te handhaven.

Samenstelling van de boorspoeling

Bentoniet/Bengel	28,5 kg/m ³
Super Hi Vis	5,0 kg/m ³
Caustic Soda	2,0 kg/m ³
Poly Low	tot 10 kg/m ³

Technische parameters / gemiddelde gegevens

SG (soortelijk gewicht)	1,05 - 1,06 kg/l
Marsh viscositeit	48 s/qt - 55 s/qt
Ph	9 - 11
Waterverlies	5 cm ³ / 30 min.
Yield point	10 - 15 lbs / 100 ft ²

Voor de speciale operaties zoals het plaatsen van de tweede liner werd in de boring een Hi Vis pill gezet om het afzetten van het zand te reduceren.

Verwerken van de boorspoeling

Het verwerken van zowel de vaste als vloeibare fase van de bij het boren vrijkomende bruto spoeling werd uitgevoerd door de firma R.O.W. - de Ruiters te Schoonebeek.

De verwerking en de opwerking van de vrijkomende spoelingshoeveelheden hield in dat deze op een doelmatige en op een voor het milieu verantwoorde wijze zou plaatsvinden.

In dit geval impliceerde dit:

- Een doelmatige scheiding van vaste en vloeibare fase;
- Een maximaal te bereiken volumereductie van de vaste fase;
- Een effectieve zuiveringsmethode van de vloeibare fase.

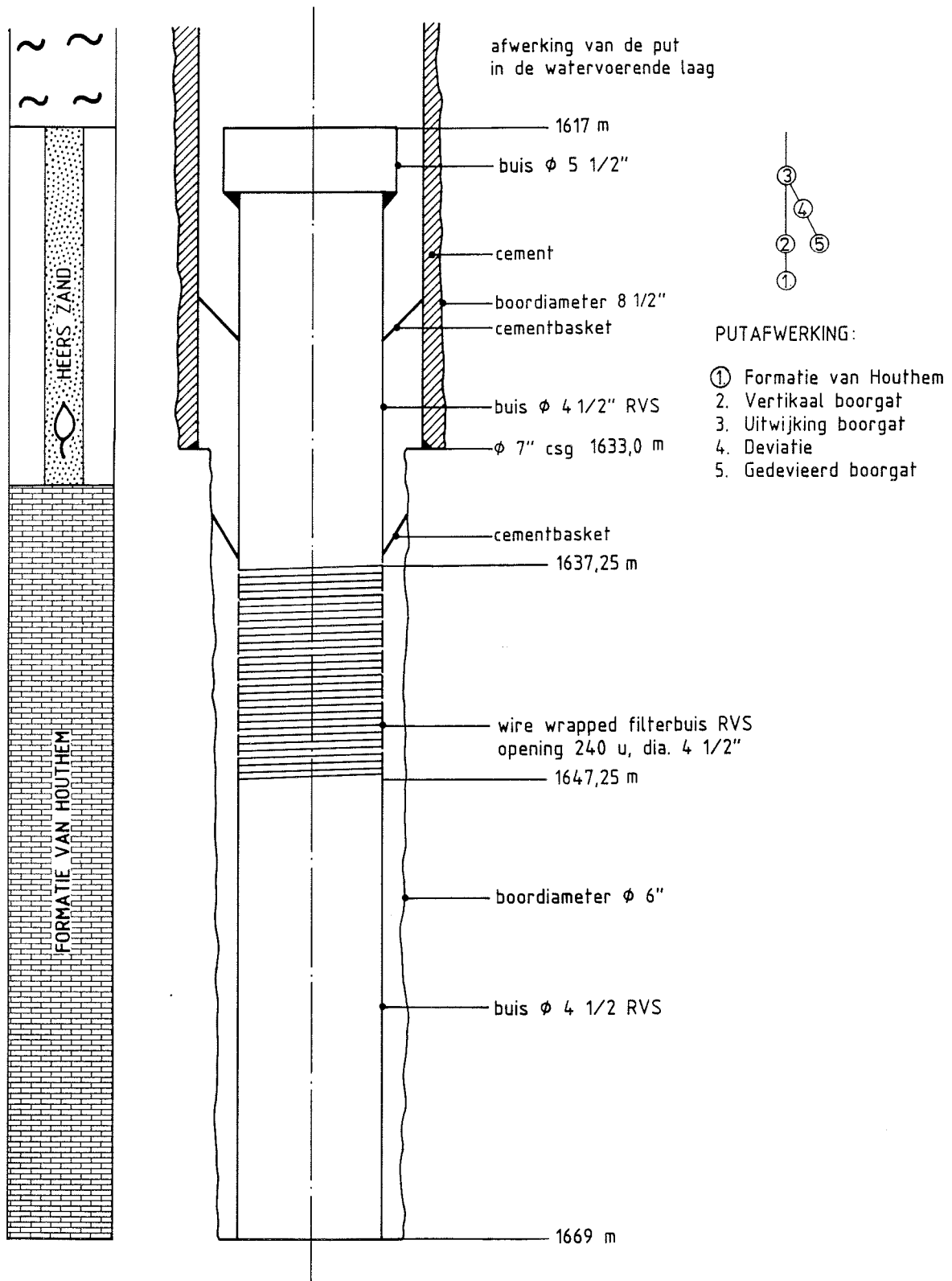
De procesmatige verwerking van de in beide passages toe te passen methodieken moest volledig beantwoorden aan de van overheidswege opgelegde criteria en toetsingsnormen, opgenomen in het provinciaal afvalstoffenplan Noord-Brabant en de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren (W.V.O.).

Gedurende het procesverloop vond op gezette tijden controle plaats op naleving van de wettelijke voorschriften.

De wijze van verwerking

De vrijgekomen boorspoeling werd in de installatie van de boormachine voor een groot gedeelte van vaste stoffen ontdaan. Dit geschiedde met behulp van een dubbele trilzeef, een "desander" en een "desilter". De gezuiverde spoeling werd opnieuw voor het boren gebruikt. De vaste fase met de resten van de spoeling stroomde naar een mud-bassin van ca. 120 m³ inhoud waarin de eerste bezinking plaats vond. De bezinking werd versneld in de tijd door het regelmatig doseren van flocculanten.

De vloeibare fase werd vervolgens uit dit bassin naar het tweede bezinkbassin gepompt met een nuttig bergingsvolume van ca. 480 m³. In dit bassin konden de lichtere en zwevende delen, eveneens met behulp van gedoseerde vlokmiddelen, worden neergeslagen.



Figuur A-1.1.1

Details putafwerking in de Formatie van Houthem.

Afhankelijk van de samenstelling van de vrijkomende spoeling was de bezinkingstijd vrij variabel. De zich boven het sediment bevindende vloeibare fase in het tweede bassin werd regelmatig naar de fysisch-chemische zuiveringsinstallatie afgepompt, waarna deze werd ontdaan van de laatste verontreinigingen en tenslotte geschikt was om te worden geloosd volgens de W.V.O.-normeringen.

Relevante parameters voor de vloeibare en gezuiverde fase waren met name:

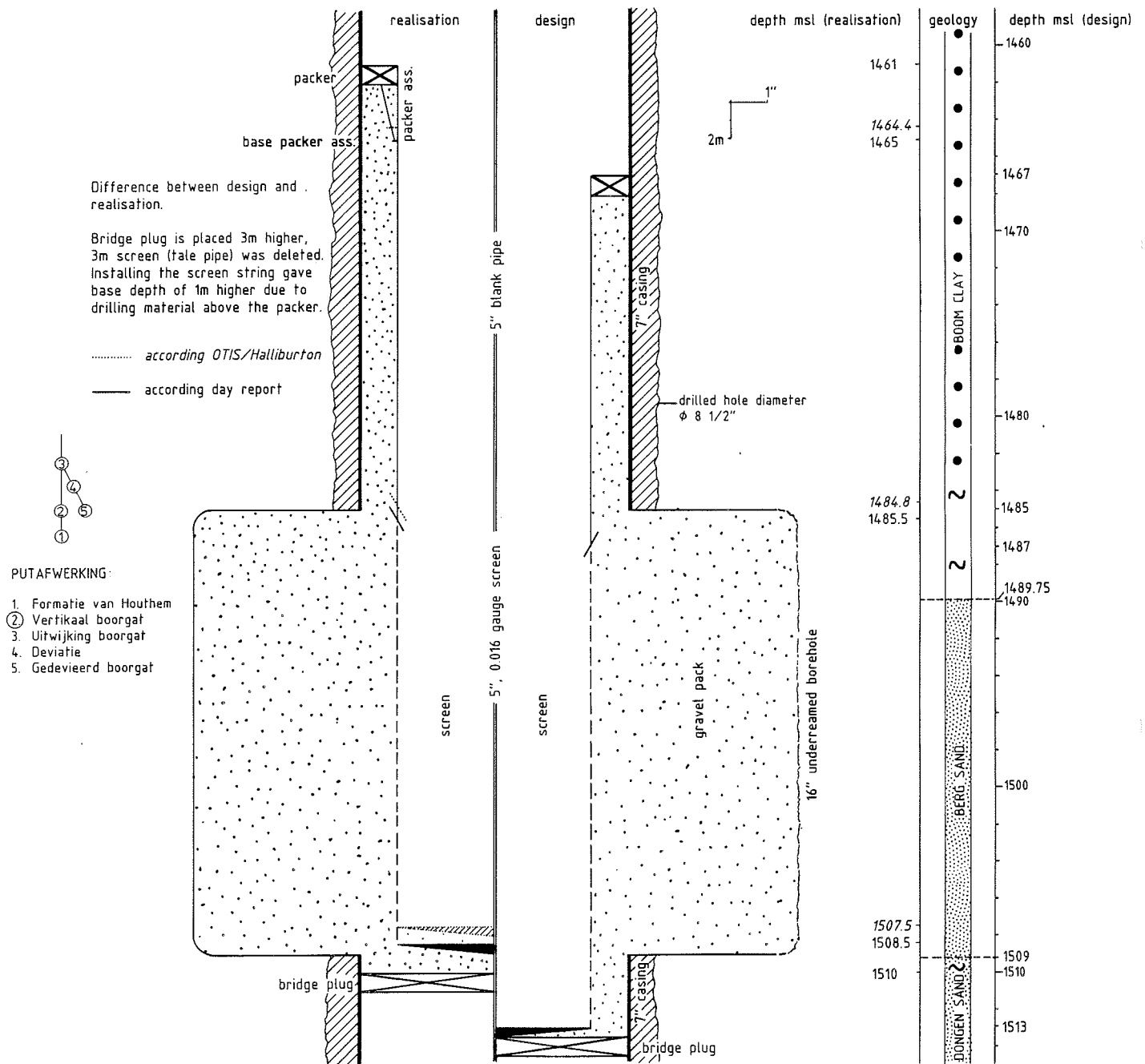
- Ph waarde;
- Chemisch Zuurstof Verbruik (CZV);
- Biologisch Zuurstof Verbruik (BZV);
- Neerslag vaste stoffen (Imhoff methode).

Het aldus behandelde water kon, nadat aan de gestelde criteria was voldaan, worden geloosd op een in de nabijheid stromende vloedgraaf.

Annex 1.2 Overzicht booractiviteiten m.b.t. het aanboren, de put-
afwerking en het testen van het Zand van Berg

Overzicht van de boorwerkzaamheden per kalenderdag tussen 6 uur
's morgens en 6 uur 's morgens de volgende dag

- 19-03-88 Aanvang werkzaamheden 06.00 uur; Inbouw 7" scraper tot
1514 m diepte; Casing scrapen en uitbouw scraper.
- 20-03-88 Plaatsen "Bridge"plug op 1510 m diepte; Inbouw K-Mill OD
156 mm tot 810 m diepte; Problemen met inbouw casing
cutten; Uitbouw K-Mill; Inbouw Taper-Mill tot 810 m
diepte; 7" casing opgeruimd tot 823,5 m diepte.
- 21-03-88 Uitbouw Taper-Mill; Caliper log met "Multi-finger"
caliper tool van Schlumberger; Inbouw K-Mill OD 151 mm
tot 1485 m diepte; Casing gefreesd tot 1491 m diepte.
- 22-03-88 Casing gefreesd tot 1500 m diepte; Problemen met
spoeling, er komen geen staalsplinters boven; Uitbouw K-
Mill; Uitcirculeren boorgat.
- 23-03-88 Inbouw K-Mill; Casing gefreesd van 1499,6 m - 1509 m
diepte; Problemen met spoeling, er komen geen
staalsplinters boven; Uitbouw K-Mill.
- 24-03-88 Uitcirculeren boorgat; Inbouw 5" Chip catcher.
- 25-03-88 Inbouw Chip cather tot 1502 m diepte; Uitbouw Chip
catcher; Uitcirculeren boorgat; Boorgat gepeild tot
diepte van 1503,5 m.
- 26-03-88 Inbouw Circulation Junk Basket tot 1503 m diepte;
Spoelend en draaiend diepte van 1509 m bereikt; Uitbouw
Junk Basket; Inbouw 16" underreamer tot diepte van
1485 m; Zand van Berg onderruimd van 1485 - 1509 m
diepte; Uitbouw underreamer.



Figuur A-1.2.1 Details putafwerking in het Zand van Berg in de oorspronkelijke proefboring.

27-03-88 Uitbouw underreamer; Inbouw 7" scraper tot diepte van 1480 m; Tussen 820 - 830 m en 845 - 855 m gescrapd; Uitbouw scraper; Caliper log Welex van onderruimd traject; Inbouw 4 1/2" filterbuis.

28-03-88 Gravel pack operatie Halliburten; Inbouw luchtlift systeem.

Figuur A-1.2.1 toont de putafwerking in het Zand van Berg in de oorspronkelijke proefboring.

29-03-88 Inbouw luchtlift systeem; Put ontwikkelen d.m.v. luchtlift door Ingersoll Rand; Maximum debiet 6 m³/uur, na een uur staakt produktie.

30-03-88 Gedeeltelijke uitbouw luchtlift systeem; Dieptepeiling DGV, problemen met diepte-indicatie; Verdere uitbouw luchtlift systeem.

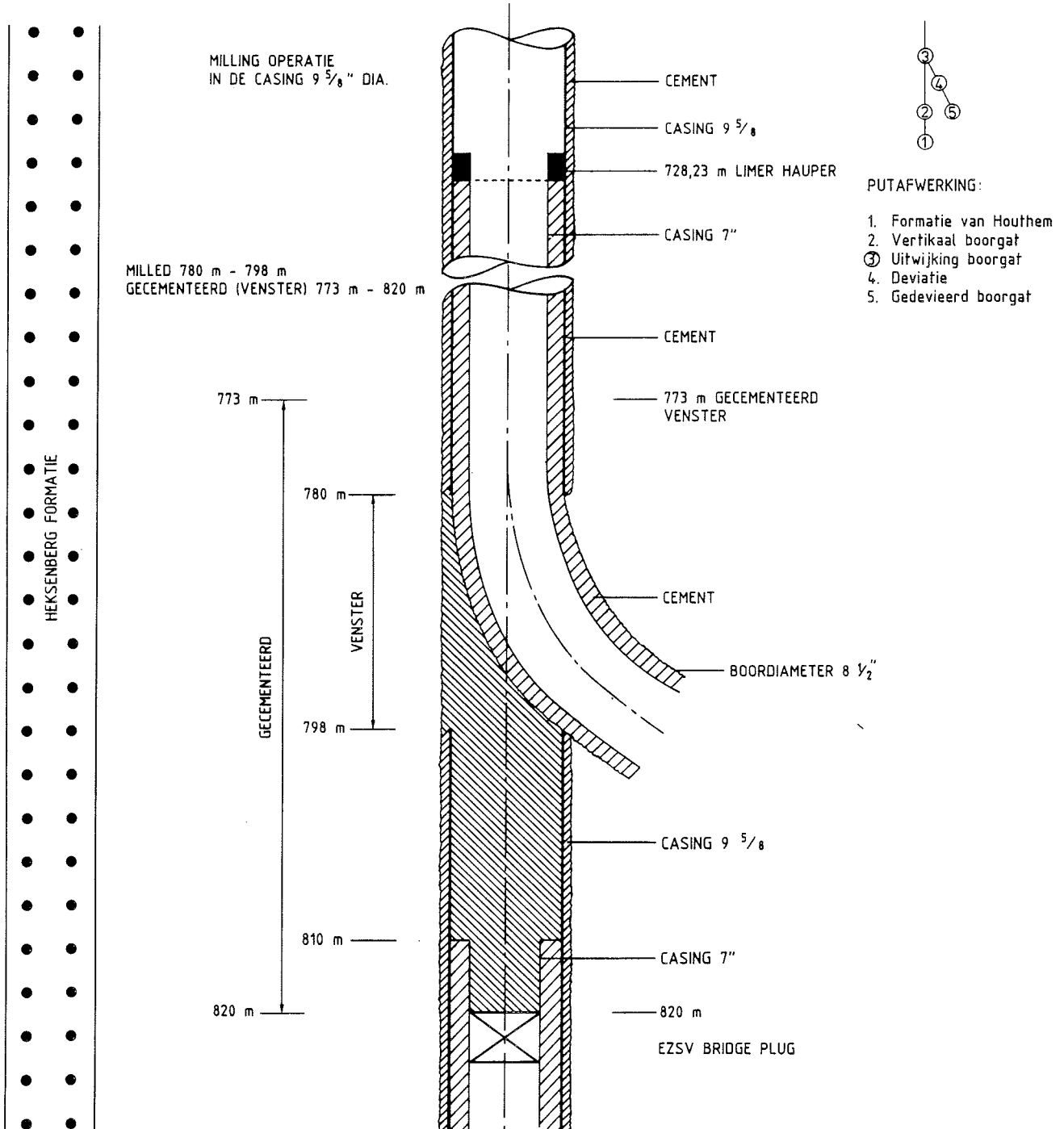
31-03-88 Dieptepeiling Welex; Dieptemeting bevestigt vermoeden dat filter is beschadigd.

1-04-88 tot 6-04-88 onderbreking werkzaamheden

6-04-88 Inbouw packer pulling tool door OTIS; Bij uitbouw blijkt retrievable packer niet te zijn opgepikt, packer en tool beschadigd.

7-04-88 Beraad m.b.t. voortzetting werkzaamheden; Reinigen overgangen 13 3/8" en 9 5/8" casing op diepte van 296 m en 9 5/8" en 7" casing overgang op diepte van 805 m met scraper; Uitcirculeren boorgat; Mast uitgericht.

8-04-88 Vanwege sterke indicatie dat eerdere putafwerking tijdens plaatsen of gedurende ontwikkeling onherstelbaar beschadigd werd is besloten om met behulp van een side track operatie en een gedeveierde boring nogmaals het



Figuur A-1.2.2 Details Side track in de 9 5/8" casing.

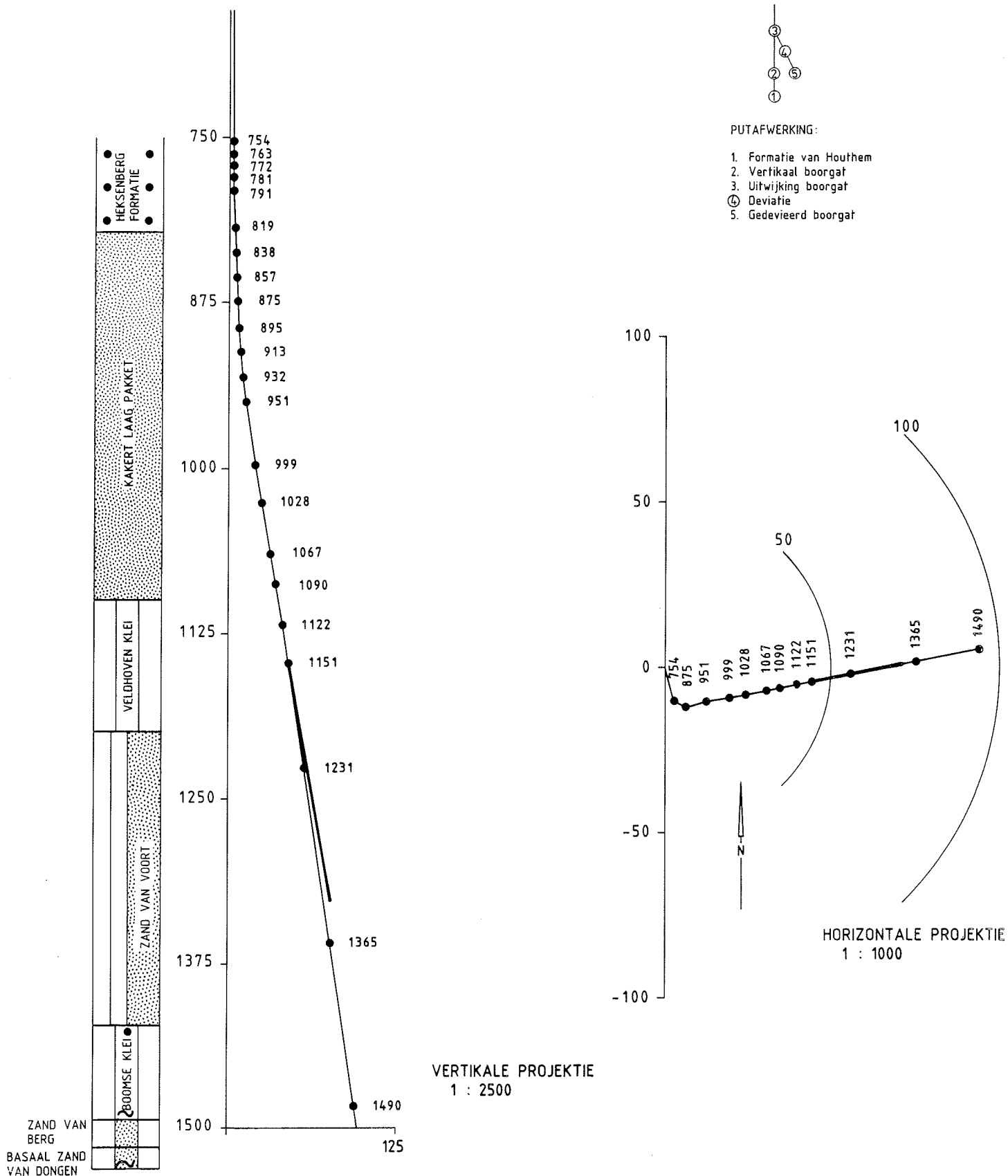
Zand van Berg aan te boren en te testen;
 Scrapen 7" casing tot een diepte van 832 m; Inbouw 7"
 EZSV Bridge plug tot een diepte van 820 m; Plaatsen
 packer; Inbouw K-Mill voor frezen venster.

- 9-04-88 Inbouw K-Mill tot 300 m diepte, geen doorgang in 9 5/8"
 casing; Vermoedelijk 9 5/8" casing collar 53/5 lb/ft
 i.p.v. opgegeven 47 lb/ft; Uitbouw K-Mill; Inbouw K-Mill
 om 9 5/8" casing op te ruimen tot diepte van 782 m;
 Frezen van venster in 9 5/8" casing van 782 tot 786 m.
- 10-04-88 Frezen van venster in 9 5/8" casing van 786 - 798 m;
 Utcirculeren boorgat; Uitbouw K-Mill.
- 11-04-88 Cementplug aangebracht van 820 - 770 m door Halliburton;
 Inbouw 8 1/2" rollerbit top cement i.p.v. op 770 m op
 784 m diepte; Uitbouw rollerbit.
- 12-04-88 Ophogen cementplug tot 765 m door Halliburton; Inbouw
 8 1/2" rollerbit, cement uitgeboord van 773 - 780 m;
 Boorgat uitgecirculeerd; Uitbouw.

Figuur A-1.2.2 toont het ontwerp van de "side track".

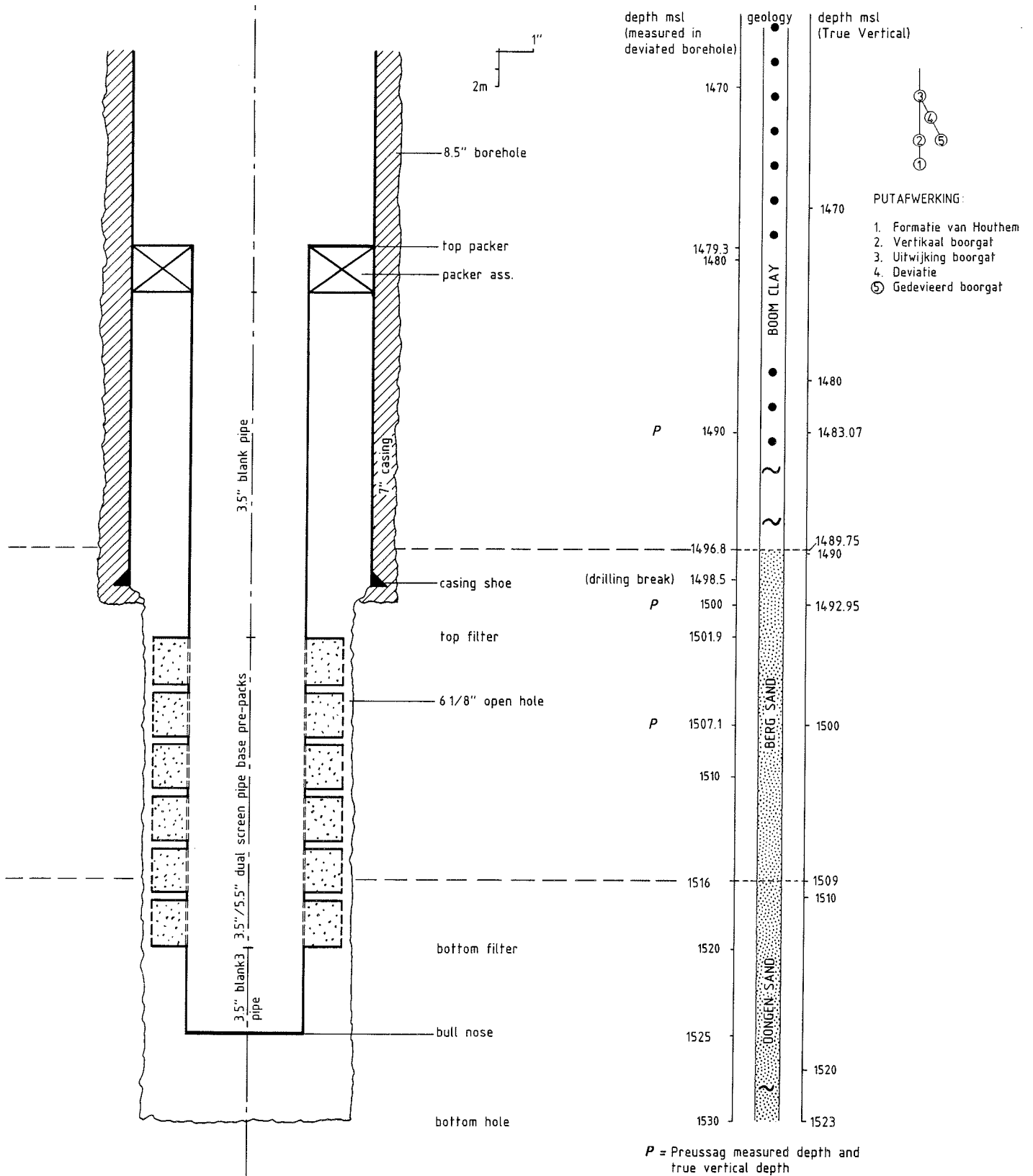
- | | | |
|----------|---|-----------------------|
| 13-04-88 | Aanvang sidetrack operatie | Boorvordering
in m |
| | Kick-off assembly geïnstalleerd;
Inbouw 8 1/2" roller beitel; Richting bepaling
door Preussag; Start sidetrack, geboord van
780 - 792 m | 12 m |
| 14-04-88 | Sidetracking van 792 - 856,5 m; Turbine gericht
door Preussag op diepte van 799,5 m | 57 m |
| 15-04-88 | Sidetracking van 856,5 - 979 m; Deviatie meting
7 maal; Turbine gericht door Preussag op diepte
van 856,5 m; Turbine uitgebouwd; Rotary string
en roller bit ingebouwd | 122,5 m |

		Boorvordering in m
16-04-88	<p>Problemen bij inbouw rotary string; Nageboord van 968 - 979 m; Geboord van 979 m - 1129 m; Deviatie meting 3 maal</p>	150 m
17-04-88	<p>Geboord van 1129 - 1272 m; Deviatie meting 4 maal</p>	143 m
18-04-88	<p>Aanpassing string, geboord van 1272 - 1329 m. Bij controle deviatiemeting komt string vast te zitten op diepte van 1326 m; Boorspoeling is hoog opgelopen; String heeft circa een uur stil- gestaan zonder circulatie; Poging om string los te krijgen mislukken.</p>	57 m
19-04-88	<p>Pogingen om string los te trekken zonder succes; Impompen lichte spoeling; Free point gemeten door Welex op diepte van 1166 - 1167 m. Op diepte van 745 m string los gemaakt.</p>	0 m
20-04-88	<p>Uitbouw 745 m 5" boorpijp; "Hydraulic jar" ingebouwd en aangekoppeld op diepte van 745 m door Red Baron; Poging om restant string ("vis") los te tikken, zonder succes; Vis is te lang en te elastisch; Uitbouw hydraulic jar; Free point meting door Welex; Free point op 1158 m; Op diepte van 1152 m string losgemaakt.</p>	0 m
21-04-88	<p>Uitbouw 407 m 5" boorpijp en "Hydraulic jar"; Boorpijp blijkt op diepte van 745 m geperforeerd te zijn waardoor zeer waarschijnlijk circa 24 uur lang het onderste gedeelte van het boorgat tussen 745 m en 1329 m zonder circulatie heeft gestaan; Besloten wordt om "Vis" te cementeren; Cementeren van restant boorstring tot diepte van 1067 m.</p>	0 m



Figuur A-1.2.3 Horizontale en verticale projectie van gedeerveerd boorgat, alsmede lokatie van achtergebleven boorstring (vis).

		Boorvordering in m
22-04-88	Inbouw 8 1/2" boorbeitel tot 1067 m diepte; Opboren cement van 1067 - 1128 m; Deviatie- meting Preussag.	(61 m)
23-04-88	Geboord van 1128 - 1207 m; Deviatiemeting Preussag.	(79 m)
24-04-88	Geboord van 1207 - 1273 m; Deviatiemeting Preussag.	(66 m)
25-04-88	Geboord van 1273 - 1379 m; Vordering sinds vastraken boorstring d.d. 18-04-88.	(56 m) 50 m
26-04-88	Geboord van 1379 - 1469 m.	90 m
27-04-88	Geboord van 1469 - 1500 m; Caliper meting Welex, Belemmering doorgang caliper tool op 1435 m diepte; Inbouw 8 1/2" boorbeitel tot diepte van 1500 m.	31 m
<p>Figuur A-1.2.3 toont de horizontale en verticale projectie van het gedeveierde gat alsmede de lokatie van de achtergebleven boorstring (vis).</p>		
28-04-88	Uitbouw boorstring; Inbouw 7" casing tot 750 m diepte; Problemen met schroefdraad casing (Baker lock).	
29-04-88	Inbouw 7" casing tot 1499 m diepte; Linerhanger afgezet op 728,23 meter diepte in 9 5/8" casing door Halliburton; Cementeren 7" casing door Halliburton; Problemen met spoeling en overtollige cement.	



Figuur A-1.2.4 Detail putafwerking in het Zand van Berg in het gederiveerde boorgat.

		Boorvordering in m
30-04-88	Uitbouw cement string; Inbouw 6 1/8" boorbeitel tot diepte van 1488 m; Uitboren cement.	
1-05-88	Uitboren cement en casing schoen; Geboord van 1500 - 1530 m (einddiepte); Boordiameter 6 1/8"; Polymeerspoeling; Boring uitgecirculeerd.	30 m
2-05-88	Uitbouw boorstring; Samenstelling filterconstructie; Inbouw 7" scraper tot 1490 m diepte; Gescreapt en uitbouw scraper; Inbouw filterconstructie tot diepte van 1525 m en afhangen filterconstructie op diepte van 1479 m door Halliburton.	
<p>Figuur A-1.2.4 toont de uiteindelijke putafwerking in het Zand van Berg in het gedeveierde boorgat.</p>		
3-05-88	Uitbouw "packer setting tool"; Inbouw 5" boorpijp tot diepte van 1000 m voor stikstoflift, verlaging stikstofinjectie punt tot 1470 m diepte; Produktie van put minimaal < 1 m ³ /uur.	
4-05-88	Zuren van boorgat door Halliburton; Reinigen en ontwikkelen boring door middel van stikstoflift; Produktie circa 10 m ³ /uur bij verlaging van 500 m.	
	Beëindiging booractiviteiten.	

ANNEX 2.1

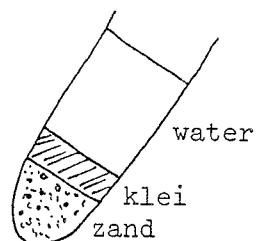
Kleimineralogisch onderzoek van de boring Asten-2

1. Geanalyseerde stalen

Formatie van Breda:	1 - 3:	875 m	-N.A.P.
	4 - 6:	876 m	
Zand van Voort:	7:	1204 m	
	8:	1201 m	
	9:	1217 m	
	10:	1213 m	
	11:	1210 m	
Klei van Boom	12:	1458 m	
	13:	1453 m	
	14:	1462 m	
Zand van Berg:	15:	1466 m	
	16:	1479 m	
	17:	1476 m	
	18:	1474 m	
	19:	1484 m	
Basaal Zand van Dongen:	20:	1488 m	
	21:	1491 m	
	22:	1496 m	
	23:	1492 m	
	24:	1502 m	

2. Methode

a. Teneinde de kleifractie te concentreren werden de stalen, na in een bekersglas met aq.dist. gedesintegreerd te zijn door roeren, gecentrifugeerd. Door het relatieve gebrek aan korrels tussen de kleifractie en de zandfractie ontstaat een nette scheiding tussen beide fracties.



Figuur A-2.1.1.

Met een spatel wordt dan de kleifractie in een plastic flesje gebracht, aangengd met water tot ongeveer 50 ml, opgeschud en na ongeveer één minuut, teneinde de toch afgeschraapte zand- en grovere siltkorrels te laten uitsedimenteren, bemonsterd via een pipet.

De pipetinhoud wordt dan op een horizontaal glasplaatje aan de lucht uitgedroogd. Op deze manier bekomt men georiënteerde plaatjes van de kleifractie.

b. Deze plaatjes worden dan in een X-stralen diffractometer bestraald teneinde karakteristieke d-afstanden te meten van 001 vlakken (oriëntatie) van kleimineralen.

Dit gebeurt per staal op een normaal luchtgedroogd plaatje, op ethyleenglycol behandeld plaatje en op een 500 °C verhit plaatje.

Het gedrag van de (001) pieken op de verschillende behandelingen, laat de karakterisatie van de kleimineralen toe.

c. De kwantificatie van de kleimineralen is steeds in routine analyses zoals deze een semi-kwantitatieve benadering. De reden hiervoor is de verschillende korrelgrootte, kristalliniteit en chemische samenstelling van de kleimineralen.

De hier gevolgde voorstelling van de resultaten is als volgt: (tabel 1).

lijn 1: de piekhoogte op de geglycoliseerde opnamevlakken van de (001) van de verschillende mineralen wordt gegeven als een relatieve maat.

lijn 2: de piekhoogtes gecorrigeerd om kwantitatieve vergelijkingen mogelijk te maken. De hier gebruikte parameters zijn deze in gebruik in het kleimineralogisch laboratorium van prof. Thorez (U.Lg.).

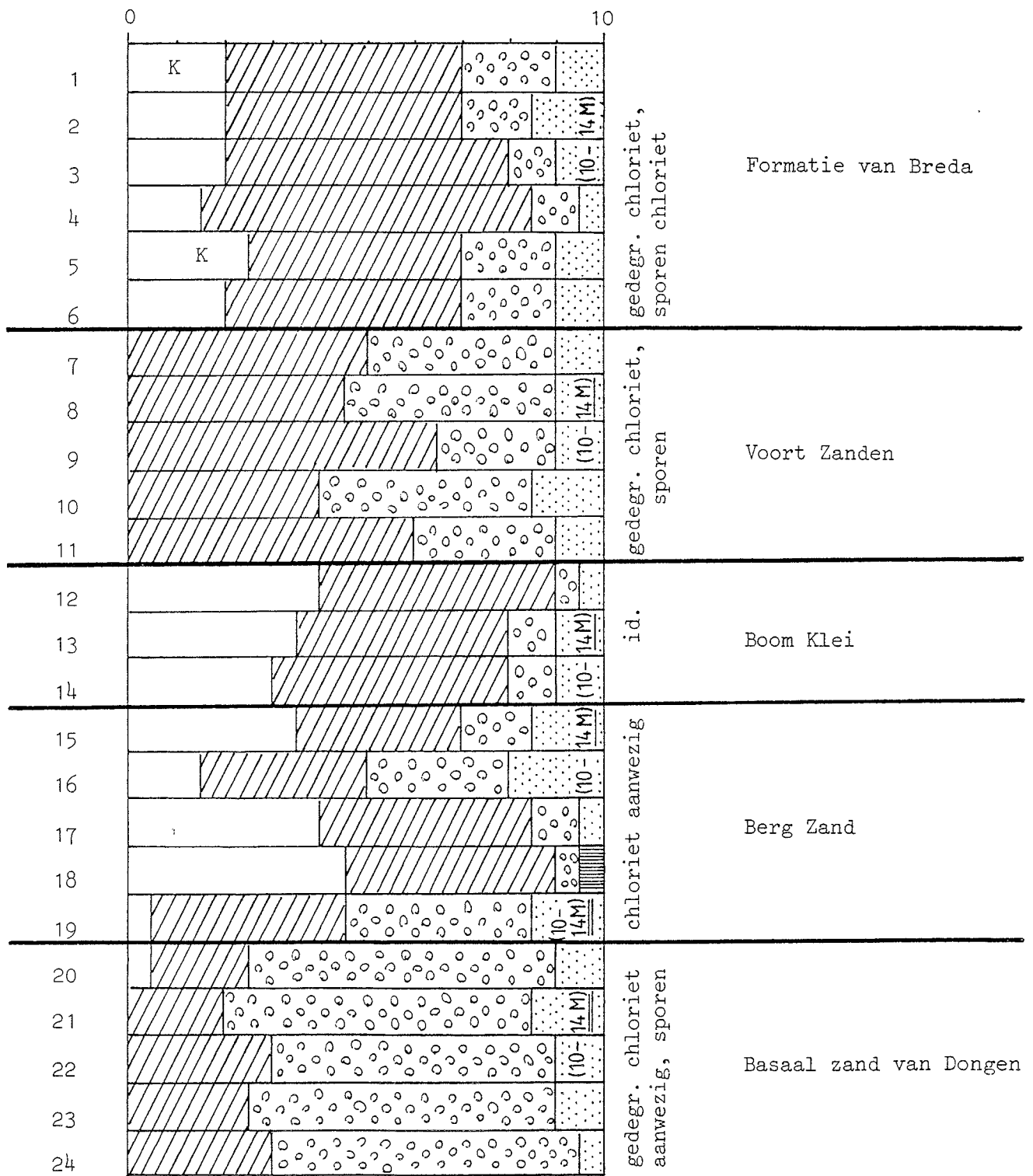
10 Å illiet = int. × 1

17 Å smectiet = int. × 0,25

7 Å kaoliet = int. × 0,7

14 Å chloriet = int. × 0,34 (gemeten op verhit plaatje)

14 Å illiet-smectiet onregelmatige interstratificatie (7° 2θ CoKα) int.
× 0,4

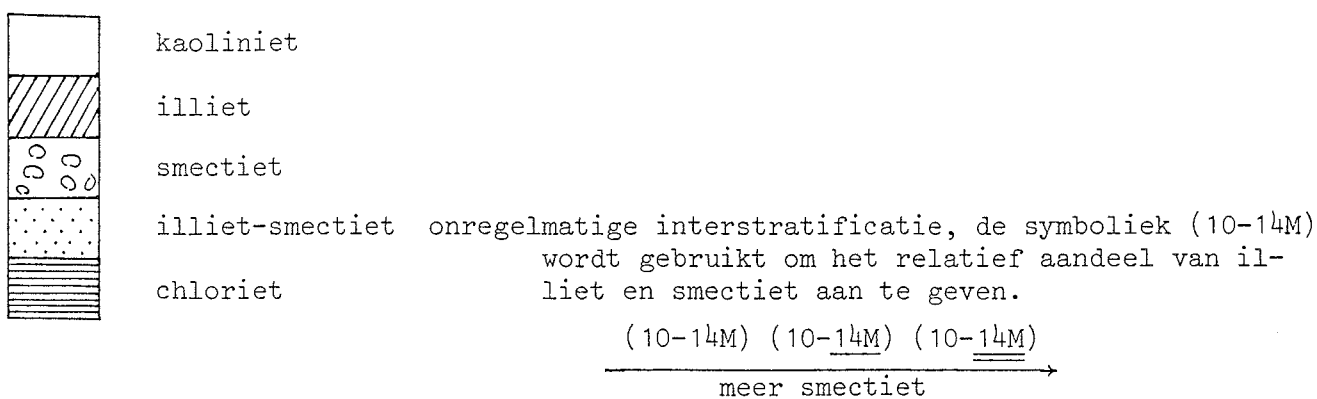


Figuur A-2.1.2.

lijn 3: kwantitatieve uitdrukking op basis van een totaal van 10.
Bemerk dat een herrekening met andere parameters mogelijk is via
lijn 1.

3. Resultaten van de kleimineralen

De resultaten zijn opgesomd in tabel 2.1. De resultaten worden
hieronder grafisch weergegeven per stratigrafisch interval.



De verschillen in deze stalen zijn niet uit-
gesproken en hangen samen met de aanwezige
hoeveelheid smectiet.

Legenda bij figuur A-2.1.2.

4. Resultaten van andere mineralen in de kleifractie

Alle stalen van de Zanden van Voort en enkel deze (7 t/m 11) bevatten
ook nog clinoptiloliet ($\pm 9 \text{ \AA}$ en $7,9 \text{ \AA}$ roosterafstanden, niet door de
verhitting aangetast).

Van één staal (11) werd ook een opname in het grotere ($^{\circ}2\theta$) bereik
gemaakt en daar werd een belangrijke hoeveelheid cristobaliet (brede
diffractie op $4,07 \text{ \AA}$) gevonden.

De associatie smectiet, clinoptiloliet, cristobaliet wordt vaak
geassocieerd met vulkanische activiteit.

Het zou zeker de moeite lonen dit punt verder uit te werken
(selectievere analyses na scheidingen, vergelijking met type boringen
in België, enz.).

<u>Staal nr.</u>	<u>Kaoliniet</u>	<u>Illiet</u>	<u>Smectiet</u>	<u>Illiet-Smectiet</u> (10-14 M)	<u>Chloriet</u>
1	7,0	13,0	17,00	6,0	sp. degr.
	4,9	13,0	4,25	2,4	
	2,0	5,0	2,00	1,0	
2	7,0	14,0	17,00	7,0	degr.
	4,9	14,0	4,25	4,9	
	2,0	5,0	1,50	1,5	
3	9,0	20,0	15,00	6,0	sp.degr.
	6,3	20,0	3,75	2,4	
	2,0	6,0	1,00	1,0	
4	11,0	35,0	22,00	9,0	degr.
	7,7	35,0	5,50	3,6	
	1,5	7,0	1,00	0,5	
5	13,0	18,0	35,00	11,0	degr.
	9,1	18,0	8,75	4,4	
	2,5	4,5	2,00	1,0	
6	11,0	18,0	25,00	9,0	sp. degr.
	7,7	18,0	6,25	3,6	
	2,0	5,0	2,00	1,0	
7	-	13,0	40,00	8,0	degr.
		13,0	10,00	3,2	
		5,0	4,00	1,0	
8	sp.	19,0	71,00	11,0	sp. degr.
		19,0	17,75	4,4	
		4,5	4,50	1,0	
9	-	15,0	24,00	4,0	degr.
		15,0	6,00	1,6	
		6,5	2,50	1,0	
10	-	21,0	100,00	24,0	degr.
		21,0	25,00	9,6	
		4,0	4,50	1,5	
11	-	12,0	24,00	4,0	degr.
		12,0	6,00	1,6	
		6,0	3,00	1,0	
12	53,0	44,0	23,00	11,0	sp. degr.
	37,1	44,0	5,75	4,4	
	4,0	5,0	0,50	0,5	

<u>Staal nr.</u>	<u>Kaoliniet</u>	<u>Illiet</u>	<u>Smectiet</u>	<u>Illiet-Smectiet</u> (10-14 M)	<u>Chloriet</u>
13	37,0 25,9 3,5	30,0 30,0 4,5	31,00 7,75 1,00	15,0 6,0 1,0	sp. onzeker preparaat losgekomen
14	37,0 25,9 3,0	44,0 44,0 5,0	50,00 12,50 1,00	21,0 8,4 1,0	+, degr.
15	28,0 19,6 3,5	19,0 19,0 3,5	28,00 7,00 1,50	18,0 7,2 1,5	degr.
16	18,0 12,6 1,5	28,0 28,0 3,5	106,00 26,50 3,00	37,0 14,8 2,0	+
17	51,0 35,7 4,0	41,0 41,0 4,5	30,00 7,50 1,00	20-8=12 4,8 0,5	(16/2 = 8) 2,72 +
18	67,0 46,9 5,0	38,0 38,0 4,0	25,00 6,25 0,50	21-13=8 3,2 +	13 4,42 0,5
19	8,0 5,6 0,5	36,0 36,0 4,0	143,00 35,75 4,00	28,0 11,2 1,5	+
20	4,0 2,8 0,5	11,0 11,0 2,0	141,00 35,25 6,50	17,0 6,8 1,0	+
21	- - -	10,0 10,0 2,0	147,00 36,75 6,50	21,0 8,4 1,5	+
22	+ + +	19,0 19,0 3,0	159,00 39,75 6,00	22,0 8,8 1,0	+
23	+ + +	12,0 12,0 2,5	128,00 32,00 6,50	15,0 6,0 1,0	sp.
24	+ + +	11,0 11,0 3,0	49,00 24,75 6,50	7,0 2,8 0,5	degr.

Tabel 2.1

ANNEX 3.1 Chemische samenstelling van het formatiewater uit de
 Formatie van Houthem.

Samenstelling Formatiewater Formatie van Houthem te Asten

Einddiepte: 1673 m Datum monstername: 22 febr. 1987
 Diepte filter: 1641-1651 m Filterlengte: 10 m
 Waterproduktie: 4 en 5,7 m³/uur
 Aquifer: Formatie van Houthem
 Gesteente: Verkarste kalkst.; karst gevuld met kleih. zand
 Druk: ca. 165 bar
 pCO₂: 0,16 bar (berekend bij T = 60 °C, Ionsterkte = 0,9)
 pH: 7,15 (bij 9,7 °C); 6,25 (berekend bij T = 60 °C,
 Ionst. = 0,9)
 Eh: +176 mvolt
 Ec: 44700 µS/cm (T 20,5 °C)

<u>Kationen</u>	<u>M</u>	<u>mg/l</u>	<u>mmol/l</u>	<u>meq./l</u>	<u>meq.%</u>
Natrium	(Na;23)	15 950,00	693,48	693,48	82,34
Lithium	(Li;6,9)	2,70	0,39	0,39	0,04
Kalium	(K;39,1)	191,00	4,88	4,88	0,57
Magnesium	(Mg;24,3)	616,00	25,35	50,70	6,02
Calcium	(Ca;40,1)	1665,00	41,52	83,04	9,86
Strontium	(Sr;87,6)	140,00	1,60	3,20	0,37
Barium	(Ba;137)	60,00	0,44	0,88	0,10
IJzer	(Fe;55,9)	7,00	0,13	0,25	0,02
Mangaan	(Mn;54,9)	0,15	0,00	0,01	0,00
Ammonium	(NH ₄ ;18)	76,00	4,22	4,22	0,50
Aluminium	(Al;27)	10,00	0,37	1,12	0,13

Som 842,17 99,95

Anionen

Chloride	(Cl;35,5)	27 600,00	777,46	777,46	99,09
Sulfaat	(SO ₄ ;96)	8,40	0,09	0,18	0,02
Bicarbonaat	(HCO ₃ ;61)	273,00	4,48	4,48	0,57
Fosfaat	(PO ₄ ;95)	29,40	0,31	0,92	0,11
Bromide	(Br;80)	105,00	1,31	1,31	0,16
Jodide	(I;127)	13,00	0,10	0,10	0,01
Fluoride	(F;19)	1,80	0,09	0,09	0,01

Som 784,54 99,97

Ongeladen complexen

Kiezelzuur	(H ₄ SiO ₄ ;96)	113,00	1,17		
Boorzuur	(H ₃ BO ₃ ;62)	172,00	4,63		
Kooldioxide	(CO ₂ ;44)	88,00	2,00		
Zwavelwaterstof	(H ₂ S;34)		geen reuk		

Totale hoeveelheid opgeloste stof (T.D.S): 47 100 mg/l

ANNEX 3.2 Chemische samenstelling van het formatiewater uit het Zand van Berg.

Samenstelling Formatiewater Zand van Berg te Asten

Einddiepte: 1510 m Datum monstername: 4 mei 1988
 Diepte filter: 1500-1520 m Filterlengte: 20 m
 Waterproductie: ca. 10 m³/uur
 Aquifer: Zand van Berg
 Druk: 150 bar Eh: -190 mV (berekend)
 pCO₂: 0,056 bar Ec: 71 000 µS/cm
 pH: 5,8

Kationen	M	mg/l	mmol/l	meq./l	meq.%
Natrium	(Na;23)	16 769,00	729,09	729,09	83,90
Lithium	(Li;6,9)	3,10	0,45	0,45	0,05
Kalium	(K;39,1)	175,00	4,48	4,48	0,50
Magnesium	(Mg;24,3)	599,00	24,65	49,30	5,67
Calcium	(Ca;40,1)	1400,00	34,91	69,83	8,00
Strontium	(Sr;87,6)	123,00	1,40	2,80	0,32
Barium	(Ba;137)	7,90	0,06	0,12	0,01
IJzer	(Fe;55,9)	149,00	2,66	5,33	0,60
Mangaan	(Mn;54,9)	2,72	0,05	0,10	0,01
Ammonium	(NH ₄ ;18)	135,00	7,50	7,50	0,86
Aluminium	(Al;27)	3,00	0,11	0,22	0,03

Som 869,22 99,95

Anionen

Chloride	(Cl;35,5)	31 500,00	887,30	887,30	99,09
Sulfaat	(SO ₄ ;96)	< 0,23			
Bicarbonaat	(HCO ₃ ;61)	44,00	0,72	0,72	0,08
Fosfaat	(PO ₄ ;95)	43,40	0,45	1,36	0,15
Bromide	(Br;80)	100,00	1,25	1,25	0,14
Jodide	(I;127)	17,00	0,13	0,13	0,02
Fluoride	(F;19)	7,00	0,41	0,41	0,05

Som 891,17 100,04

Ongeladen complexen

Kiezelzuur	(H ₄ SiO ₄ ;96)	151	Pb:	1,1
Boorzuur	(H ₃ BO ₃ ;62)	241	Co:	0,024
Zwavelwaterstof (H ₂ S;34)	geen reuk		Zn:	3,2
			Cu:	0,1
			Cr:	0,10
			Mo:	0,34
			Cd:	0,09
			As:	0,021

Totale hoeveelheid opgeloste stof (T.D.S): 51475 mg/l

ANNEX 4.1 Verklarende woordenlijst

CALIPER LOG: Een meting die de diameter van het boorgat aangeeft.

COMPRESSIONAL WAVE AMPLITUDE LOG: meet de amplitude van compressie geluidsgolven door de formatie. Deze worden opgewekt en gemeten met behulp van het sonic tool (CBL/VDL mode).

DENSITY LOG: Een radioactieve bron zendt gamma straling in de formatie. Ten gevolge van botsingen met het formatie materiaal verliezen de gamma deeltjes (fotonen) een bepaalde hoeveelheid energie, afhankelijk van de formatie dichtheid. Een detector meet de hoeveelheid teruggekaatste fotonen, die aldus een functie is van de formatie dichtheid.

DIPMETING: In een boorgat worden op microschaal drie of vier (soms meer) verschillende resistivity metingen gedaan, die een bepaalde hoek (120 of 90 graden) met elkaar maken. De aldus verkregen curves zijn onderling te correleren en hieruit is de hellingshoek ("dip") van de formatie af te leiden.

DRILL STEM TEST (DST): Een test waarbij tijdens het boorproces een vloeistof monster van de formatie genomen wordt. Per formatie interval wordt een kleinschalige "pressure build-up test" uitgevoerd.

ELECTROMAGNETIC THICKNESS LOG (ETT): Door een zender in de sonde wordt een elektromagnetisch veld gegenereerd in de verbuizing ("casing"). Hierdoor ontstaat een elektromotorische kracht in de ontvanger in de sonde. Het fase verschil tussen het signaal in de zender en de ontvanger wordt gemeten. Dit is een maat voor de dikte van de casing.

FORMATION INTERVAL TEST (FIT): Een manier om vloeistofmonsters te verzamelen over een bepaalde formatie.

FRAC FINDER LOG: poogt iets te vertellen over de mate van fracture van de formatie door middel van de verhouding van de amplitudes van schuif- en compressie geluidsgolven. Dit wordt gemeten met het sonic tool (CBL/VDL-mode).

GAMMA RAY LOG: Ieder gesteente zendt in enige mate radio-actieve straling ("gamma rays") uit. De hoeveelheid radio-actieve straling hangt echter af van het soort gesteente. Door deze straling te meten met een gamma ray log, is een onderscheid tussen verschillende gesteentes mogelijk. Kleien zenden bijvoorbeeld een hogere gamma straling uit dan zanden.

INDUCTION LOG: meet de elektrische geleiding/weerstand van de formatie. Deze wordt afgeleid uit de veranderingen van elektromagnetische velden teweegebracht door de gesteenten. Men maakt onderscheid tussen shallow/medium/deep induction logs al naar gelang de penetratie eigenschappen van de meetsonde.

INJECTIVITEIT: De mate waarmee een vloeistof of een gas door een geboord gat in een formatie geïnjecteerd kan worden.

KORRELGROOTTE VERDELING: De mate waarmee de korrels van een gesteente afwijken van de mediane korrelgrootte. De korrelgrootte verdeling is een indicatie voor de porositeit.

LITHOLOGIE: De macroscopische studie van gesteentes, met betrekking tot samenstelling en fysische eigenschappen.

MICRO RESISTIVITY LOG: Dit is een resistivity log, waarbij de elektrode afstand erg klein is (enkele inches). Hiermee wordt de formatie dichtbij het boorgat bekeken. Een dipmeting maakt gebruik van micro resistivity curves.

NEUTRON LOG: Neutronen met een bepaalde energie (snelheid) worden de formatie ingezonden. Omdat neutronen nagenoeg dezelfde massa hebben als waterstofkernen, verliezen ze hun energie voornamelijk bij botsingen met waterstofkernen. Op een bepaalde afstand van de bron wordt de overgebleven energie van de neutronen gemeten. Dit is een maat voor de hoeveelheid waterstofkernen (water of olie) in de formatie.

PALEONTOLOGIE: Het gedeelte van de geologische wetenschap dat zich bezighoudt met de beschrijving en classificatie van dierlijke en plantaardige resten (fossielen).

PALYNOLOGIE: Het gedeelte van de geologische wetenschap dat zich bezighoudt met de verspreiding van plantesporen en met de toepassingen daarvan.

PERMEABILITEIT: Een kwantitatieve grootheid voor de mate waarmee vloeistof door de poriën van een poreus gesteente doorgelaten wordt.

PETROGRAFIE: Het gedeelte van de geologische wetenschap dat zich bezighoudt met de beschrijving en classificatie van gesteentes.

POROSITEIT: De poriënruijme als fractie van het totale formatievolumen.

PRESSURE BUILD-UP TEST: Een test waarbij bepaald wordt, hoe de druk in een reservoir zich onder bepaalde omstandigheden gedraagt. Hiermee kan een uitspraak worden gedaan over de permeabiliteit en de uitgestrektheid van het reservoir en over de reservoirdruk, alsmede over de stromingsweerstand rondom de put.

REPEAT FORMATION TEST (RFT): Een test waarbij drukmetingen op verschillende dieptes tijdens de produktiefase continu genomen kunnen worden.

RESISTIVITY LOG: In de formatie wordt een gelijkstroom gegenereerd tussen een elektrode aan het oppervlak en een elektrode in het boorgat. Door met twee meetelektroden in het boorgat het potentiaalverschil over een bepaalde afstand te meten, krijgt men een waarde voor de soortelijke weerstand ("resistivity") van de formatie. Door met twee afstanden te meten ("dual spaces resistivity"), krijgt men een onderscheid tussen diepe en minder diepe penetratie van de gelijkstroom in de formatie, waaruit belangrijke formatie eigenschappen kunnen worden afgeleid.

SEDIMENTOLOGIE: Het gedeelte van de geologische wetenschap dat zich bezighoudt met ontstaan, transport en afzetting van formaties.

SHEAR WAVE AMPLITUDE LOG: meet de amplitude van schuifgolven door de formatie. Deze worden opgewekt en gemeten met behulp van het sonic tool (CBL/VDL-mode).

SONIC LOG: De voortplantingssnelheid van geluid geeft een beeld van de gesteentesoort en de porositeit van de betreffende formatie. Een "sonic log" geeft de snelheid in een boorgat weer als functie van de diepte.

De meting kan weergegeven worden als "transit time log", waarbij de tijd die het geluid nodig heeft om een bepaalde afstand af te leggen tegen de diepte is uitgezet, of de meting kan weergegeven worden in de "full wave form", waarbij de golfvorm volledig is afgebeeld. Deze meetgegevens dienen ter ijking van de met behulp van oppervlakte seismiek verkregen gegevens van de ondergrond.

SPECTRAAL ANALYSE: De studie van amplitude en fase van een signaal als functie van de frequentie. Hiermee kan het spectrum van aanwezige typen mineralen in een formatiemonster gemeten worden.

SPONTANEOUS POTENTIAL (SP) LOG: Het potentiaalverschil tussen een elektrode in het boorgat en een referentie elektrode aan de oppervlakte. Dit potentiaalverschil wordt in het boorgat opgewekt door elektrochemische en elektrokinetische effecten, en geeft een indruk van de laag opbouw.

In kleien heeft de SP-meting een vrijwel constante waarde (referentie). Afhankelijk van de saliniteit van het formatiewater zijn de SP-waarden in permeabele formaties positief dan wel negatief ten opzichte van de referentielijn.

STRATIGRAFIE: Het gedeelte van de geologische wetenschap dat zich bezighoudt met de oorsprong, samenstelling en opeenvolging van gelaagde gesteentes.

ANNEX 4.2 Berekeningsmethode voor R_t en R_w

1. Berekeningsmethode voor R_t

Om de soortelijke weerstand van de formatie R_t te berekenen uit de weerstandslogs, dienen deze gecorrigeerd te worden voor boorgatdiameter en laagdiktes. Om voor de boorgatdiameter te kunnen corrigeren, dient voor elk beschouwd interval de boorgatdiameter en de soortelijke weerstand van de boorspoeling bekend te zijn. De boorgatdiameter wordt bepaald door de gemiddelde waarde van de capiler log d_w over elk interval. De soortelijke weerstand van de boorspoeling R_m is als volgt berekend: Uitgaande van temperatuur aan maaiveld van 60 °F en een temperatuurgradiënt in het boorgat van 0,037 °F/m (uit de boorgatmetingen wordt een lineair temperatuurverloop met de diepte bepaald. Uit de gemeten waarden voor de soortelijke weerstand van de boorspoeling bij een bepaalde temperatuur wordt met de 'formule van Arps' de soortelijke weerstand op iedere diepte berekend.

Voor de gemeten waarden geldt:

450 - 1008,2	m:	$R_m = 1,48$	ohmm	58 °F
1088,2 - 1632	m:	$R_m = 0,7$	ohmm	45 °F
1632,1 - 1675	m:	$R_m = 1,01$	ohmm	60 °F

Formule van Arps:

$$R_2 = R_1 * (T_1 + 6.77) / (T_2 + 6.77) \quad [^{\circ}F] \quad . \quad (A4.1)$$

Van de aldus berekende waarden voor de soortelijke weerstand is over elk interval het gemiddelde berekend.

Met de gemiddelde waarden van R_m en d_w worden de boorgat correcties bepaald voor respectievelijk de "deep induction" log, de "medium induction log" en de "short guard resistivity" log.

Het blijkt dat voor geen van de intervallen een laagdikte correctie nodig is.

Met de gecorrigeerde waarden van de weerstandslogs wordt de waarde van soortelijke weerstand van de formatie (R_t bepaald^{1*)}.

*) Welex Log Interpretation Charts, 1985.

2. Berekeningsmethode voor R_w

Om de waterkwaliteit te bepalen uit de Spontaneous Potential uit de SP-log, dient een zogenaamde 'shale base line' gevonden te worden. Er is sprake van zoete spoeling, dus zal de SP-waarde in een shale interval hoger zijn dan in een zand interval.

Over het gehele interval (460 - 1670 m) zijn zes verschillende shale base lines gedefinieerd:

- Voor het interval 460 - 696,7 m (Vrijherenberg laagpakket) is de shale base line gevonden in hetzelfde interval (de maximale SP waarde).
- Voor het interval 706,6 - 858,5 m (Heksenberg Formatie) is de shale base line gevonden in het interval 696,6 - 706,5 m. Dit is vermoedelijk een kleilaag bovenin de Heksenberg Formatie.
- Voor het interval 858,6 - 1000 m (een 'sand-shale sequence' in de Formatie van Breda) is de shale base line in hetzelfde interval gevonden (de maximale SP waarde).
- Voor het interval 1000,1 - 1093 m (onderste gedeelte van de Formatie van Breda) is de shale base line in hetzelfde interval gevonden (de maximale SP waarde).
- Voor de intervallen 1196,1 - 1415,7 m (Voort Zand) en 1494,1 - 1513,5 m (Berg Zand) is de shale base line gevonden in de intervallen 1093,1 - 1196 m (Veldhoven Klei) en 1415,8 - 1494 m (Boom Klei). (Veldhoven en Boom hebben dezelfde SP waarde).
- Voor de intervallen 1513,6 - 1530,5 m (Basaal Zand van Dongen) en 1607,1 - 1670 m (Heers Zand en Houthem Formatie) is de shale base line gevonden in het interval 1530,6 - 1607 m (Landen Klei).

Voor de laagdiktes hoeft niet gecorrigeerd te worden, omdat de beschouwde lagen erg dik zijn ten opzichte van de straal waarover spoeling is geïnvadeerd in de formatie. De dunste laag is ca. 3 m dik en de gemiddelde invasie straal is ca. 12,5 inch (= 0,32 m).

De SP-waarde ten opzichte van de shale base lines is, met de gemeten waarden voor de 'mud filtrate resistivity' R_{mf} , in het interpretatiepakket ingevoerd om de waarde van de soortelijke weerstand van het formatie water R_w te berekenen.

460 - 1008,2 m:	R_{mf}	= 1,6 ohmm 64 °F
1008,3 - 1632 m:	R_{mf}	= 1,5 ohmm 60 °F
1632,1 - 1670 m:	R_{mf}	= 1,1 ohmm 60 °F.

ANNEX 6.1 Gebruikte energie conversie bij aardwarmte.

1 kcal	=	$4,186 \times 10^3$	Joules
1 kcal	=	$1,163 \times 10^{-3}$	kWhr
1 kcal	=	$0,132 \times 10^{-3}$	m ³ aardgas* equivalent
1 kcal	=	$0,1 \times 10^{-3}$	ton aardolie equivalent (TOE)
1 kWhr	=	$3,6 \times 10^6$	Joules
1 kWhr	=	859,85	kcal
1 kWhr	=	0,114	m ³ aardgas* equivalent
1 kWhr	=	$0,086 \times 10^{-3}$	ton aardolie equivalent (TOE)
1 Joule	=	$0,239 \times 10^{-3}$	kcal
1 Joule	=	$0,278 \times 10^{-3}$	kWhr
1 Joule	=	$0,131 \times 10^{-6}$	m ³ aardgas* equivalent
1 Joule	=	$0,023 \times 10^{-9}$	ton aardolie equivalent (TOE)
1 m ³ aardgas*	=	$7,56 \times 10^3$	kcal
1 m ³ aardgas*	=	$31,65 \times 10^6$	Joules (onderwaarde)
1 m ³ aardgas*	=	8,79	kWhr
1 m ³ aardgas*	=	$0,757 \times 10^{-3}$	ton aardolie equivalent (TOE)
1 ton aardolie equivalent (TOE)	=	$1,322 \times 10^3$	m ³ aardgas* equivalent
	=	$41,868 \times 10^9$	Joules
aardgas*	=	Slochteren aardgas	